

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

«На правах рукопису»
УДК 612.314

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) Ю.С. Ямненко
(ініціали, прізвище)
“ ____ ” _____ 2019 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра**

зі спеціальності _____ 171 Електроніка
(код і назва)

освітня програма (спеціалізація) _____ Електронні компоненти і системи

на тему: _____ Прогнозне керування системою Smart Grid

Виконав: студент II курсу, групи _____ ДС-81мп
(шифр групи)

_____ Яременко Михайло Костянтинович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник доцент каф. ПЕ, к.т.н., доц.. Клен К.С. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант технічного розділу _____ д.т.н., проф. Жуйков В.Я. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент _____ професор каф. ААЕ, д.т.н., проф. Найда С.А. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант
по нормоконтролю _____ доцент кафедри ПЕ, к.т.н. Батрак Л.М. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра промислової електроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Освітня програма (спеціалізація) Електронні компоненти і системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

(підпис) Ю.С. Ямненко
(прізвище ініціали)

« ____ » _____ 2019 року

З А В Д А Н Н Я

НА МАГІСТЕРСЬКУ ДИСЕРТАЦІЮ СТУДЕНТУ

Яременко Михайло Костянтинович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації _____ Прогнозне керування системою Smart Grid

науковий керівник дисертації _____ Клен К.С., доцент каф. ПЕ, к.т.н., доц _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від « 07 » листопада 2019 року № 3859-с

2. Термін подання студентом дисертації « 12 » грудня 2019 року _____

3. Об'єкт дослідження електричні процеси в системах розосередженої генерації

4. Вихідні дані дані швидкості вітру з м.Київ за 21-27 лютого 2019 р. та
з м. Базель, Швейцарія за 7 грудня 2019 р. з періодичністю в 1 год.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Принципи побудови та керування
системами розосередженої генерації. 2. Методи прогнозування метеоданих та оцінка
ефективності прогнозування. 3. Прогнозування швидкості вітру обраними методами. 4.
Розроблення стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Презентація

7. Орієнтовний перелік публікацій 1. М. К. Яременко «Відтворюваність вимірів швидкості вітру». Збірник праць XI міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2018», с. 288-291. 2. Яременко М. К. Оцінка рівня енергії вітрового потоку за супровідними даними / М. К. Яременко, К. С. Клен // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2019. – Том 24, №2. – С. 56–63

8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада Консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
технічний	д.т.н., проф. Жуйков В.Я.	06.10.2019	06.10.2019

9. Дата видачі завдання 06 листопада 2019 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд існуючих рішень у даній галузі, обґрунтування необхідності розробки	15.02.19-01.05.19	
2	Огляд та аналіз теоретичних відомостей та літератури за темою розробки	02.05.19-01.06.19	
3	Розробка програмного забезпечення	02.06.19-01.08.19	
4	Моделювання з використанням розробленого програмного забезпечення	02.08.19-01.09.19	
5	Аналіз отриманих результатів	02.09.19-01.10.19	
6	Розробка стартап-проекту	02.10.19-01.12.19	

Студент

(підпис)

М. К. Яременко

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

К. С. Клен

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Стратегічною метою розвитку електроенергетичного комплексу України є створення інтелектуальних енергосистем розосередженої генерації, таких як Smart Grid та Micro Grid. При побудові таких систем з відновлюваними джерелами енергії необхідно вирішувати проблеми ефективного використання енергії.

Метою даної роботи є дослідження енергетичних процесів у системі розосередженої генерації з вітроустановкою за умови реалізації прогнозування та корекції значень швидкості вітру.

Для реалізації ефективної роботи акумулятора у системі розосередженої генерації з вітроустановкою необхідно прогнозувати значення швидкості вітру на деякий інтервал часу. Прогнозування проводилось методами Адамса, Гемінга, Мілна та з використанням інтерполяційних поліномів Ньютона степенів 1-6 та з дальністю прогнозу від 1 до 6 годин, з подальшим порівнянням та оцінкою результатів. Були розраховані значення середніх відносних похибок прогнозування для середнього значення швидкості вітру та для миттєвих значень швидкості вітру. Було розроблено корегуючий алгоритм для покращення середньої відносної похибки та обрано метод прогнозування, що дає найменшу середню відносну похибку прогнозу. Було розроблено програмне забезпечення у середовищі Matlab для його використання в системі розосередженої генерації з вітроустановкою.

В результаті дослідження було з'ясовано, що найменшу середню відносну похибку прогнозування дає використання інтерполяційних поліномів Ньютона 1-го степеню.

Ключові слова: система розосередженої генерації; відновлювані джерела енергії; ефективне використання енергії; прогнозування; метод предиктор-коректор; інтерполяція.

АННОТАЦИЯ

Стратегической целью развития электроэнергетического комплекса Украины является создание интеллектуальных энергосистем рассредоточенной генерации, таких как Smart Grid и Micro Grid. При построении таких систем с возобновляемыми источниками энергии необходимо решать проблемы эффективного использования энергии.

Целью данной работы является исследование энергетических процессов в системе рассредоточенной генерации с ветроустановкой при реализации прогнозирования и коррекции значений скорости ветра.

Для реализации эффективной работы аккумулятора в системе рассредоточенной генерации с ветроустановкой необходимо прогнозировать значения скорости ветра на некоторый интервал времени. Прогнозирование проводилось методами Адамса, Геминга, Милна и с использованием интерполяционных полиномов Ньютона степеней 1-6 и с дальностью прогноза от 1 до 6:00, с последующим сравнением и оценкой результатов. Были рассчитаны значения средних относительных ошибок прогнозирования для среднего значения скорости ветра и для мгновенных значений скорости ветра. Был разработан корректирующий алгоритм для улучшения средней относительной погрешности и выбран метод прогнозирования, дает наименьшую среднюю относительную погрешность прогноза. Было разработано программное обеспечение в среде Matlab для его использования в системе рассредоточенной генерации с ветроустановкой.

В результате исследования было выяснено, что наименьшую среднюю относительную погрешность прогнозирования дает использование интерполяционных полиномов Ньютона 1-й степени.

Ключевые слова: система рассредоточенной генерации; возобновляемые источники энергии; эффективное использование энергии; прогнозирование; метод предиктор-корректор; интерполяция.

SUMMARY

The strategic goal of the development of the electric power complex of Ukraine is the creation of intelligent distributed generation power systems, such as Smart Grid and Micro Grid. When building such renewable energy systems, it is necessary to solve the problems of efficient use of energy.

The purpose of this work is to study the energy processes in a system of dispersed generation with wind turbine, provided the realization of forecasting and correction of values of wind speed.

To realize the efficient operation of the battery in a distributed generation system with a wind turbine, it is necessary to predict the value of wind speed for a certain interval of time. Prediction was performed by the methods of Adams, Heming, Milne and using Newton interpolation polynomials of grades 1-6 and with a prediction range of 1 to 6 hours, with subsequent comparison and evaluation of results. Mean relative prediction errors for average wind speed and instantaneous wind speed values were calculated. A correction algorithm was developed to improve the average relative error and the prediction method was chosen to give the lowest average relative error of the forecast. Software has been developed in Matlab for use in a distributed generation system with wind turbine.

The study found that the lowest average relative error of prediction is made by using Newton's 1st degree interpolation polynomials.

Key words: distributed generation system; renewable energy; efficient use of energy; prediction; predictor-corrector method; interpolation.

ЗМІСТ

	Ст.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	5
ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	9
1.1. Системи розосередженої генерації	9
1.2. Енергія вітру.....	11
1.3. Прогнозне керування системою розосередженої генерації.....	19
Висновки до першого розділу.....	21
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТЕОДАНИХ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ	23
2.1. Класифікація методів прогнозування	23
2.1.1. Еталонні методи.....	24
2.1.2. Фізичні методи і методи чисельного прогнозування погоди..	25
2.1.3. Статистичні методи	26
2.1.4. Методи МСР.....	27
2.1.5. Методи штучного інтелекту	29
2.1.6. Гібридні методи	29
2.2. Критерії оцінки точності прогнозування	30
2.3. Прототипування методів.....	30
2.4. Прогнозна модель	33
2.5. Інтерполяційні формули Ньютона	33
2.6. Методи схеми «предиктор-коректор»	36
2.6.1. Метод Мілна.....	38
2.6.2. Методи Адамса	39
2.6.3. Метод Гемінга	41
Висновки до другого розділу	41
РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ОБРАНИМИ МЕТОДАМИ	43

3.1. Результат прогнозування з використанням коригуючого алгоритма	43
3.2. Порівняння результатів з коригуючим алгоритмом та без	54
3.3. Результати прогнозування з використанням вихідних даних з більшою та з меншою дисперсією	57
Висновки до третього розділу	63
РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ	64
4.1. Етапи розроблення стартап-проекту.....	64
4.2. Опис ідеї проекту	66
4.3. Технологічний аудит ідеї проекту	67
4.4. Аналіз ринкових можливостей запуску проекту.....	67
4.5. Розробка маркетингової програми проекту	70
Висновки до четвертого розділу.....	71
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТОК. ЛІСТИНГ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ	
РЕФЕРАТ	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВДЕ – відновлювані джерела енергії
РГ – розосереджена генерація
РГЕ – розосереджена генерація енергії
АБ – акумуляторна батарея
СК – система керування
Н – навантаження
КП – коригуючий пристрій
І – інвертор
З/П – зарядний пристрій
СГ – синхронний двигун
ШП – широтно-імпульсний перетворювач
ВК – вітроколесо
ТН – трансформатор
М – мережа
СНЕ – система накопичення енергії
ВЕС – вітроелектрична установка
ME – mean error
MSE – mean square error
NMSE – normalized mean square error
RMSE – root mean square error
NRMSE – normalized root mean square error
MAE – mean absolute error
NMAE – normalized mean absolute error
MPE – mean percentage error
MAPE – mean absolute percentage error
NWP – numerical weather prediction
AR – autoregressive model
ARMA – autoregressive moving-average model
ARIMA – auto-regressive integrated moving average
MCP – measure-correlate-predict
ШІ – штучний інтелект
ШНМ – штучна нейронна мережа
ПЗ – програмне забезпечення

ВСТУП

Актуальність теми. Значне використання електроенергії, особливо, з використанням відновлюваних джерел енергії, тісно пов'язано з новим напрямком галузі інтелектуальної енергетики, що у світі отримала назву Smart Grid. Smart Grid – це повністю автоматизована енергетична система, що забезпечує двосторонній потік електричної енергії та інформації між електричними станціями й пристроями. Внаслідок використання новітніх інструментів, методів та технологій Smart Grid надає електроенергетиці «інтелект», що дає змогу підвищити ефективність роботи енергетичних систем. Основною проблемою забезпечення ефективності використання відновлюваних джерел енергії, у тому числі і вітроустановок, є нестабільний та імовірнісний характер енергії на виході цих джерел. Наявність у системах розосередженої генерації накопичувачів, зокрема, акумуляторів, вказує на необхідність прогнозування значень енергії первинного потоку, зокрема швидкості вітру, для забезпечення їх ефективної роботи.

Прогнозуванню метеоданих, зокрема швидкості вітру присвячені роботи А. Снітковського, А. Лебедева, прогнозуванню стаціонарних часових рядів – роботи П. Уїтла, Д. Бокса, Г. Дженкінса.

Отже, прогнозування значень потоку первинної енергії для забезпечення ефективної роботи акумулятора у системах розосередженої генерації є актуальною темою досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація була підготовлена відповідно до науково-дослідного плану кафедри промислової електроніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського.

Метою дослідження є визначення оптимального чисельного методу прогнозування швидкості вітру для використання у системах розосередженої генерації з відновлюваними джерелами енергії.

Для досягнення поставленої мети були вирішені наступні **завдання**:

- Огляд існуючих чисельних методів прогнозування;
- Програмна реалізація методів;
- Порівняння ефективності використання методів;
- Розробка методу додаткової корекції прогнозу.

Об'єктом дослідження є методи прогнозування метеоданих є системи прогнозного керування для систем розосередженої генерації.

Предметом дослідження є вибір простого у реалізації методу прогнозування значень швидкості вітру.

Методи дослідження: при розв'язанні поставлених у роботі завдань для побудови прогнозної моделі зміни швидкості вітру використано методи вирішення диференціальних рівнянь. Математичні розрахунки проведено на персональному комп'ютері з використанням програмного пакету Matlab.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше запропоновано прогнозування швидкості вітру з використанням методів Адамса, Гемінга та Мілна та порівняння їх з прогнозуванням на основі інтерполяційних поліномів Ньютона (надалі – метод Ньютона).

Вперше запропоновано використання додаткового корегуючого алгоритму для покращення результатів прогнозу. На основі аналізу методів прогнозування для керування системами розосередженої генерації обрано метод Ньютона з використанням корегуючого алгоритму, що дозволяє забезпечувати мінімальну похибку при малому обсязі обчислень.

Практичне значення одержаних результатів полягає в виробленні рекомендацій для:

1. Вибору оптимального чисельного методу для прогнозування метеоданих.
2. Визначення оптимальної кількості годин для прогнозу.

Особистий внесок здобувача. Дисертаційна робота є узагальненням результатів досліджень, проведених автором самостійно. Робота [1] написана автором дисертації особисто. У роботі, опублікованій із співавторами,

дисертанту належать: [2] – побудова матриці коефіцієнтів кореляції, побудова графіків коефіцієнтів кореляцій, апроксимація графіків рядом Фур'є.

Апробація результатів дисертації. Теоретичні положення та результати магістерського дослідження обговорювалися на: XI міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018» м.Київ, 3-5 квітня 2018 р.; V Науковій конференції молодих вчених та студентів «Generation – Transmission – Use GPW-2018», VI Науковій конференції молодих вчених та студентів «Generation – Transmission – Use GPW-2019».

Публікації. Основні положення та результати магістерського дослідження висвітлено у наступних публікаціях:

1. М. К. Яременко «Відтворюваність вимірів швидкості вітру». Збірник праць XI міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «Електроніка-2018», с. 288-291.

2. Яременко М. К. Оцінка рівня енергії вітрового потоку за супровідними даними / М. К. Яременко, К. С. Клен // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2019. – Том 24, №2. – С. 56–63.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 69 найменувань та xx додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 95 сторінок, у тому числі 77 сторінок основного тексту, 33 рисунки та 30 таблиць.

РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТА КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

1.1. Системи розосередженої генерації

Відновлювані джерела енергії – це джерела енергії, які при її виробленні не виснажуються або можуть відновлюватися протягом життя людини. До відновлюваних джерел енергії входять джерела, що засновані на використанні енергії вітру – вітроелектростанції, сонячної енергії – сонячні панелі, геотермальної енергії – геотермальні теплові насоси, біомасу – пристрої, що використовують біотопливо та гідроенергетику – гідроелектростанції [3].

Більшість відновлюваних джерел енергії отримують енергію безпосередньо або опосередковано від сонця. Важливо зазначити, що терміни "відновлювана енергія", "зелена енергія" та "екологічно чиста енергія" не є взаємозамінними у всіх випадках; наприклад, "екологічно чистий" вугільний завод – це вугільна установка з технологією зменшення викидів. Сам вугільний завод досі не є джерелом "відновлюваної енергії". "Зелена енергія" – це частина відновлюваної енергії, яка може мати низькі або нульові викиди та низький вплив на навколишнє середовище [4].

На відновлювані джерела енергії припадає 13,5% загального обсягу енергоресурсів у світі та 22% електроенергії у світі. Розпорядженням від 18 серпня 2017 р. український уряд схвалив Енергетичну стратегію України, яка передбачає, що до 2035 р. частка ВДЕ в енергетичному секторі становитиме 11% [5]. Станом на 2018 рік в Україні встановлено 742,5 МВт нових генеруючих потужностей ВДЕ, що майже в 3 рази більше, ніж роком раніше, повідомляється в звіті Нацкомісії, що здійснює держрегулювання в сферах енергетики і комунальних послуг [6].

Значних успіхів в останні роки досягнуто у створенні систем керування розосередженої генерації енергії – систем, які мають змогу генерувати

електроенергію поруч з місцем її використання. Подібні системи можуть застосовуватися як для обслуговування одного об'єкту, такого як дім чи будівля, так і бути частиною мереж мікрогрід, наприклад, на великому промисловому об'єкті, військовій базі або кампусі коледжу. Підключившись до ліній електропостачання, системи розосередженої генерації забезпечують постачання електроенергії додатковим споживачам та зменшують втрати електроенергії у лініях електропередач. Створення подібних систем тісно пов'язано з новим напрямком галузі інтелектуальної енергетики, що у світі отримала назву Smart Grid [7].

Smart Grid – це повністю автоматизована енергетична система, що дозволяє здійснювати двосторонній енергетичний та інформаційний зв'язок між електричними станціями та пристроями, що дає змогу підвищити ефективність роботи енергетичних систем [8].

До переваг, пов'язаних з використанням Smart Grid, належать [9,10]:

- ефективніша передача електроенергії;
- швидше відновлення електроенергії після зникнення живлення внаслідок аварії;
- скорочення витрат на комунальні послуги та, в кінцевому рахунку, менші витрати на електроенергію для споживачів;
- рівномірне завантаження електромережі, особливо у час пікового навантаження;
- краща інтеграція систем генерації електроенергії, включаючи системи відновлюваних джерел енергії;
- поліпшена безпека;

Хоча підключення систем РГ до розподільної мережі має вище зазначені переваги, поряд з цим створює нові проблеми, з якими доводиться стикатися як при самому підключенні, так і при керуванні режимами роботи системи електропостачання з розподіленою генерацією. Розосереджена електрична мережа може потребує коригування поточкорозподілу внаслідок

того, що вона може бути нерівномірно завантаженою, корегування при цьому можливо провести шляхом відповідної реконфігурації електромережі [11].

1.2. Енергія вітру

Вітер – циркуляційні переміщення повітряних мас, викликане нерівномірністю нагріву земної поверхні (непостійністю на протязі доби, сезону та у просторі), а також обертанням Землі навколо своєї осі, викликаним так званою коріолісовою силою інерції (з грецької *καρυον* горіх, ядро горіха – вид Землі з космосу). Інакше кажучи це глобальні умови, що викликають повітряні потоки циркуляції атмосфери Землі [12].

Хоча існує багато причин локального характеру, що викликають «місцеві вітри», тобто вітри, характерні для певних регіонів земної поверхні. Місцеві вітри виникають незалежно від потужніших повітряних потоків, лише накладаючись на них або ж являють собою місцеві видозміни загальних потоків.

Вітер на різних висотах в атмосфері Землі для кожної точки її поверхні характеризується швидкістю, яка є випадковою величиною у просторі та часі та залежить від багатьох факторів місцевості, сезону року та погодних умов. З вітром як рухом вітрових мас нерозривно зв'язане поняття швидкості вітру. У залежності від швидкості вітру вітри класифікують наступним чином:

- 2...3 м/с – слабкий (ледь відчувається);
- 4...7 м/с – помірний (хитаються тонкі гілки дерев);
- 10...12 м/с – сильний (хитаються товсті гілки дерев);
- 15...20 м/с – буря;
- 20...30 м/с – шторм;
- більше 30 м/с – ураган.

Тому всі процеси, що прямо пов'язані з використанням поточного значення швидкості вітру, зокрема, генерації електроенергії у вітроелектричних установках, мають складний випадковий характер, тому їх

характеристики мають статистичний розкид, і невизначеність середніх очікуваних значень. Тому на сучасному рівні досліджень задача їх оцінки формулюється як створення імовірнісного процесу на окремі часові інтервали, у межах кожного з яких можна використовувати наближення стаціонарності, тобто, незалежність всіх параметрів від часу. У якості періоду стаціонарності можуть бути прийняті різні часові інтервали з певною точністю наближення до реальних параметрів, у залежності від реальних умов випадкового процесу. Зокрема, з деяким наближенням можна вважати процес стаціонарним на протязі всього часу, що розглядається, наприклад, на протязі дня, місяця чи року.

Структура вітрового потоку за конкретний проміжок часу характеризується рядом величин:

- 1) середньою швидкістю вітру;
- 2) поривчатістю вітру;
- 3) мінливістю вітру;
- 4) тривалістю падінь-підйомів швидкостей вітру вище та нижче середнього значення.

Середня швидкість вітру визначається як середнє арифметичне ряду миттєвих швидкостей, виміряних через рівні проміжки часу:

$$v_{\text{сер}} = \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{n},$$

де $v_{\text{сер}}$ – середня швидкість вітру, v_i – миттєві значення швидкості вітру, n – кількість миттєвих вимірів.

Поривчатість вітру – це величина, що характеризує відхилення миттєвого значення швидкості вітру від середнього значення. Поривчатість вітру описує величину провалів-підйомів швидкості вітру і характеризується граничним, середнім та найбільш імовірним (середньоквадратичним) значеннями:

$$K_{\text{cp}} = v_{\text{cp}} - v_{\text{сер}},$$

де $v_{пред}$ – найбільше або найменше миттєве значення швидкості вітру

$$K_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{cp})}{n};$$

$$K_{cp.кв.} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - v_{cp})^2}{n}}.$$

Мінливість вітру – це швидкість зміни вітрового потоку, яка визначається максимальним та середнім значеннями:

$$\sigma_{макс} = \frac{v_{макс} - v_{мін}}{\Delta t},$$

де Δt – час між вимірами миттєвих значень.

$$\sigma_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{v_{i+1} - v_i}{\Delta t_i}}{n}.$$

Тривалості провалів та підйомів швидкості вітру являють собою величини інтервалів ($\Delta \tau$), на протязі яких швидкість вітру має більше або менше за середнє значення швидкості вітру.

У багатьох дослідженнях були запропоновані різні типи функцій розподілу швидкості вітру, у тому числі табличні – Поморцева, Грінцевича, Гулена, та аналітичні – Гріневича, Вейбула, Релея. При цьому було з'ясовано, що з простих аналітичних розподілів швидкості вітру найточніші результати у діапазоні швидкостей 4-20 м/с можна отримати при використанні двопараметричного розподілу Вейбула [13]:

$$F(v) = e^{\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right]};$$

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k},$$

де c – параметр, що характеризує масштаб зміни функції розподілу за віссю швидкості, k – параметр, що характеризує крутизну розподілу.

При відсутності турбулентності об'єм повітря, що проходить за одиницю часу через поперечний переріз площею A , що перпендикулярний до вектора швидкості вітру, має кінетичну енергію:

$$E = \frac{mv^2}{2} t.$$

Оскільки мова йде про енергію за одиницю часу, то це потужність:

$$P_0 = \frac{mv^2}{2},$$

де «маса» повітря визначається як маса повітря в об'ємі циліндру або паралелепіпеду з площею основи A та висотою, рівною швидкості v . З урахуванням щільності повітря ρ , миттєва потужність буде рівною:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A V^3.$$

Вітроустановка – це пристрій для перетворення кінетичної енергії вітру у механічну або електричну енергію, зручну для практичного використання [14]. Механічна енергія зазвичай використовується для підйому води у сільських або віддалених місцевостях. Вітроустановки можуть виробляти електроенергію для побутових або промислових потреб, працювати у загальній електромережі, разом з іншими автономними електростанціями, або окремо.

Перед встановленням вітроелектростанції, одразу після вибору майданчику для її встановлення, на тому ж місці встановлюють тимчасові метеовежі для збору метеоданих для збору даних протягом 1-3 років до початку будівництва. Дані вежі можуть потім бути переобладнані у стаціонарні метеовежі для оцінки ефективності роботи вітрових турбін [15].

Вітрова електростанція зазвичай містить наступні складові:

- Основа: виконується із залізобетону і має бути достатньо міцною, щоб утримати вагу турбіни і не дати їй перевернутися. Основа турбіни зазвичай має 18-19 метрів у діаметрі і заглиблена на 3-4 метри. Діаметр

основи становить від 4 до 6 метрів. У деяких випадках додатково використовуються польові або опорні конструкції для утримання основи.

- Вітрова турбіна: містить ротор або вітроколесо, що перетворює енергію вітру в енергію обертання валу, кабіну або гондолу, у якій зазвичай розташований редуктор (деякі турбіни працюють без редуктора), генератор та інші механічні та електричні пристрої. Більшість сучасних моделей вітрових турбін промислового масштабу мають конструкцію з 3 лопатей та ротора, розташованих з вітряної сторони вежі та з механізмом, що повертає турбіну проти вітру. Однак, наприклад, виробник Nordic, випускає дволопатеві турбіни, що дозволяє зменшити їх вартість за рахунок використання меншої кількості лопатей, а, відповідно, і матеріалів, але така конструкція має вищий рівень шуму у процесі роботи та потребує додаткового обладнання.

- Вежа: зазвичай мають трубчасту форму, що надає зручніший та безпечніший доступ до гондoli за допомогою східців всередині вежі та дозволяє внизу вежі встановити розподільний пристрій та контрольне обладнання. Більшість сучасних вітряних турбін встановлюються на вежах висотою від 80 до 100м, висота може бути вищою при збільшенні розміру турбіни, але максимальна висота обмежується діаметром її основи.

- Система збору (енергії): включає низку підземних кабельних ліній середньої напруги, які з'єднують кожну окрему турбіну з підстанцією, розташованою на території станції або поряд з нею. При роботі з великими потужностями підстанція може з'єднуватися надземними лініями з місцевою розподільчою або постачальною системою.

- Система підключення: подає зібрану енергію з ліній середньої напруги до одного або декількох підвищувальних трансформаторів, після чого воно подається до надземних ліній.

- Під'їзні дороги: у деяких випадках виникає потреба у створенні під'їзних шляхів до місця встановлення турбіни, щоб забезпечити постійний

доступ для потреб будівництва, експлуатації і технічного обслуговування об'єктів станції.

- Додаткові елементи: у випадку середніх або великих станцій можуть бути додатково присутні ремонтний цех, місце для зберігання частин тощо [16,17].

Схема типової трьохлопатевої турбінної установки показано на рис. 1.1.



Рис. 1.1. Схема стандартної трьохлопатевої турбінної установки

Вітроустановки класифікуються за багатьма ознаками: за конструкцією вітроколеса, його розташуванням відносно осі обертання по відношенню до поверхні землі, принципу дії, швидкості обертання тощо. За конструкцією вітроколеса існує 2 види вітроустановок: з горизонтальною віссю обертання (горизонтально-осьові) та з вертикальною (вертикально-осьові). Вітроустановки з горизонтальною віссю обертання складають близько 98% всіх вітроустановок, під'єднаних до мереж енергосистем [18].

Горизонтально-осьові ВЕУ (наприклад, на рис. 1.1) всі пропелерного типу. Обертальною силою даних ВЕУ є підйомна сила. Вітрова турбіна може відрізнитися за конструкцією (рис. 1.2) і являти собою вітроколесо з певною кількістю лопатей або не мати їх взагалі, хоча зазвичай використовується

конструкція у вигляді вітроколеса з 3 лопатями.. Вітроколесо у робочому положенні зазвичай розташовується перед вежею відносно вектору швидкості вітру і автоматично встановлюється «на вітер» за допомогою віндрозного механізму [19].

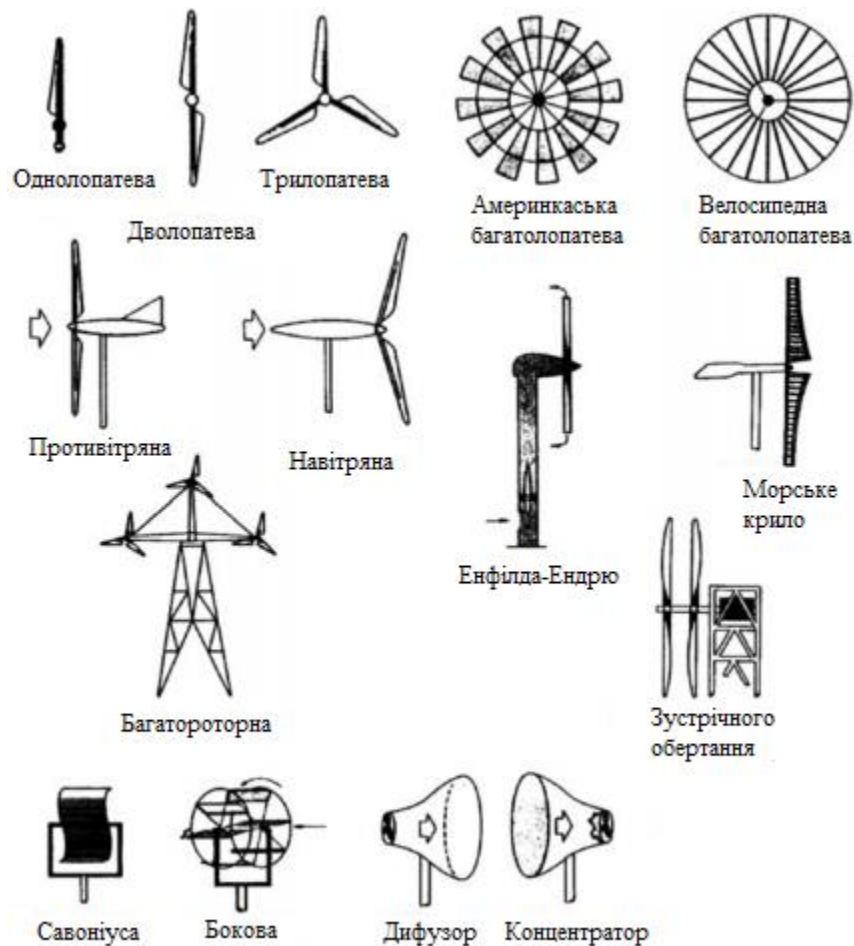


Рис. 1.2. Горизонтально-осьові ВЕУ з різними типами вітрової турбіни

Вертикально-осьові ВЕУ не потребують орієнтації на вітер а також дозволяють розташовувати усі механізми знизу, але ці переваги цілком покриваються недоліками:

- схильність до поступових руйнувань внаслідок авто коливних процесів;
- пульсація обертаючого моменту призводить до пульсацій потужності та інших параметрів генератора;

- підшипник головного валу ВЕУ – головна слабкість конструкції, яка перешкоджає побудові та довготривалому використанню вертикально-осьових ВЕУ [20].

Сучасні поширені вітрові турбіни промислового типу мають потужність у діапазоні від 1,6 МВт до 3,0 МВт на турбіну [21,22].

Формула потужності вітроустановки має наступний вигляд [23]:

$$P_{BEU} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot A \cdot v^3,$$

де ρ – щільність повітря, C_p – коефіцієнт потужності або коефіцієнт використання вітру (для горизонтально-осьових ВЕУ має найвище значення $C_{p\max} = 0,595$ за критерієм Бетца-Жуковського [24]), $A = \frac{\pi D^2}{4}$, D – діаметр вітроколеса. Або з урахуванням того, що енергія від вітроколеса передається через редуктор, формула буде мати наступний вигляд:

$$P_{BEU} = 0,3925 \cdot C_p \cdot \rho \cdot D^2 \cdot v^3 \cdot \eta_{\text{мех}} \cdot \eta_{\text{ген}}.$$

Електромагнітна потужність генератора, що з'єднаний з вітроколесом, визначається у першу чергу потужністю, що підводиться до нього з валу та коректується системою керування.

Зі зміною швидкості вітру змінюється швидкість обертання вітроколеса, за якої потужність на валу вітроколеса є максимальною. Крива потужності – це характеристика зміни потужності вітроколеса та електричного генератора у залежності від швидкості обертання, яку можна побудувати знаючи залежність C_p від швидкості вітру або зняти криву потужності під час емпіричних дослідів [25]. Загальний вигляд характеристик наведено на рис. 1.3.

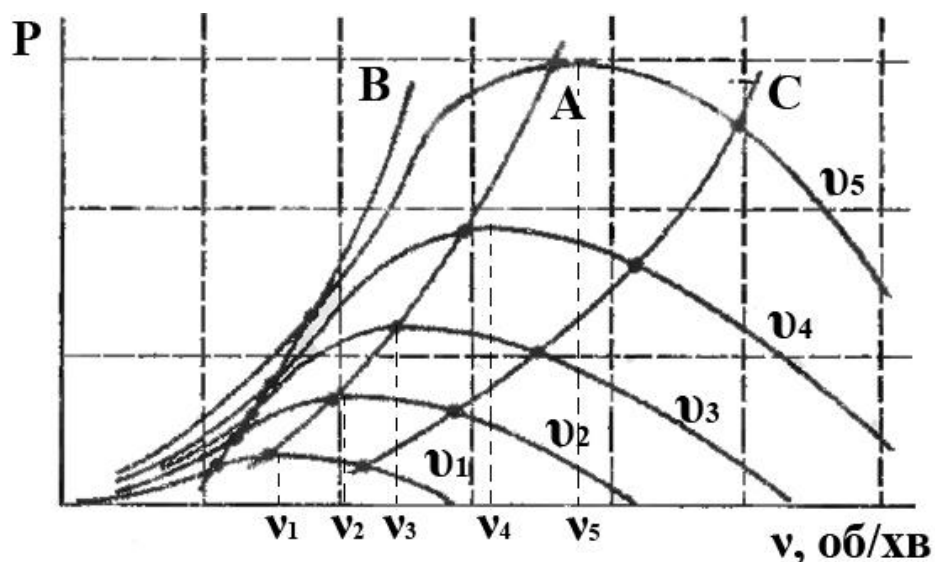


Рис. 1.3. Характеристики потужності вітроколеса та генератора вітроустановки

З рис.1.3. видно, що максимальну потужність вітроколеса при незмінній швидкості вітру можна досягти при певному числу оборотів, при якому крива характеристики його потужності проходить через вершини кривих потужності генератора вітроустановки. Це відповідає кривій А. На кривій В зображений нестійкий режим роботи вітроустановки, а на кривій С вітрогенератор працює з недовантаженням, тобто, меншим значенням C_p . Змінювати число оборотів за хвилину можна змінюючи передавальне відношення мультиплікатора [26].

1.3. Прогнозне керування системою розосередженої генерації

На рис.1.4. зображено блок-схему системи розосередженої генерації, що використовується. Синхронний двигун використовується для перетворення механічної енергії вітроколеса в електричну енергію змінної напруги та постійної частоти. Система керування використовується для керування станом всіх перетворювачів електроенергії, а коригуючий пристрій виконує передачу енергії між вітроустановкою, АБ та навантаженням.

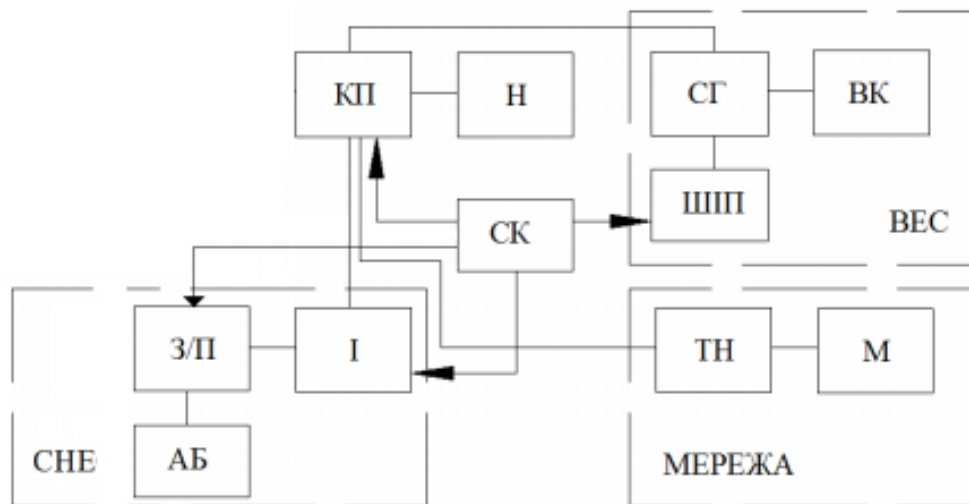


Рис. 1.4. Блок-схема системи розосередженої генерації

Трансформатор використовується для гальванічної розв'язки вітроустановки та мережі і потрібен для того, щоб викиди енергії у мережу не здійснювали руйнівного впливу на вітроустановку. ШП разом з системою керування узгоджує потужність вітрогенератора та синхронного генератора при змінній частоті обертання вітроустановки, тобто є пристроєм відбору максимальної енергії [27].

Акумуляторна батарея – це елемент, здатний накопичувати (акумуляувати) енергію. При повній відсутності вітру або його нестабільності, особливо при недостатці енергії, що отримується від вітроустановки, батарея віддає енергію у навантаження – напругу або за допомогою інвертора-перетворювача [28], її заряд АБ починає зменшуватися або зовсім пропадає. При наявності з'єднань з лінією електропередач зовнішньої мережі, АБ можна заряджати і від даної мережі, причому передбачення або розрахунок використаної та згенерованої за день або інший період часу енергії дозволить планувати закупівлю потрібної кількості бракуючої або відсутньої енергії у нічний час за зниженими тарифами, що разом зі стабільною подачею електроенергії до споживача знизить її вартість.

Визначальними факторами при виборі акумуляторних батарей є ємність батареї, номінальна напруга мережі, кількість циклів розряду, строк

служби батареї, вартість та умови, при яких буде працювати батарея (умови обслуговування, температура, наявність спеціального приміщення і т.д.).

У низько бюджетних системах можуть бути використані автомобільні батареї. Одним з недоліків їх використання є необхідність їх обслуговування: потрібно наймати персонал, який буде слідкувати за рівнем та щільністю електроліту, регулярно проводити вирівнюючий заряд АБ, і т.д. (або робити це власноруч), а також їх низька ємність. У зв'язку з цим, при використанні систем на базі відновлюваних джерел енергії, доцільно використовувати, хоча і дорожчі, герметичні АБ, для яких не потрібно обслуговування. Такі АБ мають більшу у порівнянні зі стартерними батареями товщину пластин електродів, тому час їх служби у режимі тривалого розряду набагато перевищує час служби стартерних батарей.

Найвідомішими компаніями, що випускають в даний час акумулятори великої потужності, є ZBB Energy Corporation (Австралія), Premium Power Corporation (США) і NGK (Японія) [29].

Зарядний пристрій потрібен для відновлення заряду АБ. Коли батарея заряджена, інвертор перетворює постійну напругу у змінну для передачі до навантаження. Низький заряд батареї (нижче певної межі) негативно впливає на ресурс роботи та довговічність АБ. Спроба заряджати АБ, коли вона уже є зарядженою також негативно впливає на неї. Мережа є не обов'язковою ланкою та використовується для того, щоб у випадку, коли акумуляторна батарея розряджена, а вітроустановка не може працювати у номінальному режимі та віддавати необхідну кількість енергії, навантаження отримувало мало змогу отримувати її з мережі [30].

Висновки до першого розділу

Усі процеси, що прямо пов'язані з використанням поточного значення швидкості вітру, зокрема, генерації електроенергії у вітроелектричних установках, мають складний випадковий характер, їх характеристики мають

статистичний розкид, і невизначеність середніх очікуваних значень. Тому на сучасному рівні досліджень задача їх оцінки формулюється як створення імовірнісного процесу на окремі часові інтервали, у межах кожного з яких можна використовувати наближення стаціонарності, тобто, незалежність всіх параметрів від часу.

Вітроустановка використовується у якості пристрою для перетворення кінетичної енергії вітру у електроенергію для побутових або промислових потреб, працювати у загальній електромережі, разом з іншими автономними електростанціями, або окремо. Найпоширенішими є вітроустановки з горизонтальною віссю обертання та 3 лопатями.

Система керування у складі вітроустановки використовується для керування станом всіх перетворювачів електроенергії, а коригуючий пристрій виконує передачу енергії між вітроустановкою, АБ та навантаженням.

При повній відсутності вітру або його нестабільності, особливо при недостатці енергії, що отримується від вітроустановки, батарея віддає енергію, її заряд АБ починає зменшуватися або зовсім пропадає. Коли АБ заряджена, інвертор перетворює постійну напругу у змінну для передачі до навантаження. Низький заряд батареї (нижче певної межі) негативно впливає на ресурс роботи та довговічність АБ. Спроба заряджати АБ, коли вона уже є зарядженою також негативно впливає на неї. При наявності з'єднань з лінією електропередач зовнішньої мережі, АБ можна заряджати від даної мережі, причому передбачення або розрахунок використаної та згенерованої за день або інший період часу енергії дозволить планувати закупівлю потрібної кількості бракуючої або відсутньої енергії у нічний час за зниженими тарифами, що разом зі стабільною подачею електроенергії до споживача знизить її вартість.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТЕОДАНИХ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ

2.1. Класифікація методів прогнозування

У даний час для прогнозування швидкості вітру застосовується багато різних методів. Методи прогнозування можуть бути класифіковані за різними ознаками. Наприклад, за дальністю прогнозу на коротстрокові, середні та довгострокові [31,32]. У табл. 2.1 указані приблизні діапазони дальності прогнозу та відповідні їм види прогнозування, а також задачі, які частіше за все відносяться до даного виду прогнозування.

Таблиця 2.1

Види прогнозування швидкості вітру за дальністю прогнозу

Вид прогнозування	Діапазон прогнозу	Застосування
Дуже короткостроковий	Від кількох хвилин до однієї години	Регулюючі дії у інформаційних системах керування
Короткостроковий	Від однієї до декількох годин	Економічне планування навантаження
Середній	Від декількох годин до 1 тижня	Ринкове саморегулювання
Довгостроковий	Від 1 тижня до 1 року та більше	Загальний аналіз тенденцій

Також усі методи прогнозування швидкості вітру можна розділити за типом моделі, що використовується даним методом для прогнозування [33]. Публікується багато робіт, присвячених як комплексному всебічному огляду сучасних підходів до прогнозування швидкості вітру (наприклад, [34,35]), так і опису окремих модифікованих рішень (наприклад, [36,37]).

У результаті аналізу статей та літератури, присвячених прогнозуванню швидкості вітру, можна виділити декілька сучасних і найчастіше застосованих класів методів у залежності від моделі прогнозування [38]:

- еталонні методи;
- фізичні методи та методи чисельного прогнозування погоди;
- статистичні методи;

- методи штучного інтелекту;
- гібридні методи.

2.1.1. Еталонні методи

Існує кілька дуже простих в реалізації методів прогнозування, які в той же час можуть бути досить ефективними. У літературі їх можна зустріти під загальною назвою методи блукання (lagwalk). Порівняння з цими методами дозволяє оцінити доцільність реалізації та застосування складніших методів. У деяких випадках один з еталонних методів може стати найкращим варіантом вирішення завдання прогнозування ряду. Однак в більшості випадків методи даної групи застосовуються для тестування складніших методів. Робиться це для того, щоб переконатися, що розроблений метод дає значно меншу похибку при прогнозуванні значень ряду, ніж прості еталонні методи. В іншому випадку складніший в реалізації метод, швидше за все, застосовувати не доцільно.

Метод середнього. В даному методі прогноз наступного значення приймається рівним середньому арифметичному всіх попередніх значень. Якщо позначити відомі значення за $y_1 \dots y_N$ та їх кількість за N , то прогноз можна записати наступним чином:

$$\bar{y} = \frac{y_1 + \dots + y_N}{N}.$$

Метод сталості. У зарубіжній літературі цей метод можна також зустріти під назвою “naïve predictor”. Суть даного методу полягає в тому, що всі прогнозовані значення приймаються рівними останньому спостереженому значенню. Це означає, що якщо виміряна швидкість вітру в момент часу t була $v(t)$, то прогноз на момент часу $t + \Delta t$ може бути представлений як:

$$v(t + \Delta t) = v(t).$$

Даний підхід часто використовується у порівнянні для оцінки ефективності інших методів, у тому числі методів чисельного прогнозування.

Методи сталості часто дають кращий результат, ніж методи чисельного прогнозування при дуже короткій дальності прогнозу [38]. Недоліком даного методу є той факт, що точність моделі швидко зменшується зі збільшенням періоду прогнозу. Також подібний підхід не зможе передбачати різкі пориви і ослаблення вітру, що вкрай важливо для інтегрованих систем управління (ІСУ) автономних енергокомплексів.

Сезонний метод сталості. Даний метод є варіацією методу сталості для даних, що мають яскраво виражену сезонність. Тут прогнозоване значення приймається рівним останньому спостереженому значенню того ж періоду, для якого робиться прогноз (наприклад, того ж місяця попереднього року).

Метод зсуву. Метод зсуву є ще однією варіацією методу сталості. Даний метод дозволяє прогнозованому значенню збільшуватися або зменшуватися з плином часу, де величина зміни, що зветься зміщенням, дорівнює середньому значенню зміни, що спостерігається у накопичених даних. Прогноз значення для часу $T + h$ можна дати як

$$y_T + \frac{h}{T-1} \sum_{t=2}^T (y_t - y_{t-1}) = y_T + h \left(\frac{y_T - y_1}{T-1} \right),$$

де T – кількість вимірювань. Цей вираз еквівалентний проведенню лінії між точками першого і останнього спостереження та екстраполюванні її в майбутнє.

2.1.2. Фізичні методи та методи чисельного прогнозування погоди

Значення швидкості вітру є дуже важливим параметром в системах вітроенергетики. Однак значення швидкості вітру завжди залежить від атмосферних погодних умов (рис. 2.1), тому в чисельному прогнозуванні початковим етапом в прогнозі швидкості вітру є передбачення майбутніх значень таких змінних як: температура, відносна вологість, інтенсивність світла, атмосферний тиск.

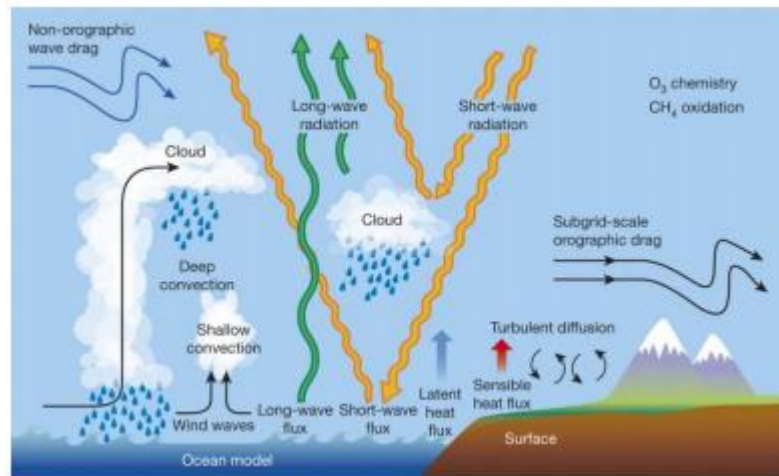


Рис. 2.1. Фізичні процеси, що мають значення при прогнозі погоди

Все це застосовується в моделі чисельного прогнозування погоди NWP. Даний підхід заснований на кінематичних фізичних рівняннях, які враховують різні метеорологічні дані і перетворюють швидкість вітру в вітряну енергію, шляхом вирішення складної математичної моделі [39].

Методи, які використовують фізичні рівняння і підходи NWP, зазвичай реалізуються на суперкомп'ютерах, так як вимагають дуже великого обсягу обчислень. Це також залишає подібні методи малопридатними для застосування у вбудованих системах автономних енергокомплексів. Існуючі комерційні методи прогнозування вітряної енергії використовують прогноз вітру NWP у якості початкових даних. Фізичні системи, використовуючи вхідні дані від NWP, виконують необхідне уточнення цих даних в умовах цільової місцевості [40]. Прогноз найефективніших моделей даного класу варіюється від 48 до 172 годин вперед [34].

2.1.3. Статистичні методи

Дані про зміну характеристик вітру в часі, що передаються датчиками з анеморумбометра (швидкість, напрямок вітру, інтенсивність турбулентності, температура повітря) є впорядкованими в часі числовими значеннями. Таким чином, зібрані за певний проміжок часу, дані про значення характеристик вітру можуть бути розглянуті як часові ряди. Отже, для аналізу і

прогнозування даних швидкості вітру можуть бути застосовані всі відомі статистичні методи аналізу і прогнозування часових рядів. Те ж стосується і інших можливих до розгляду характеристик вітру, що впливають на його швидкість: напрямок вітру (може бути представлений як кут в градусах або радіанах), температура повітря, інтенсивність турбулентності (числовий показник), вологість (числовий показник). Статистичні методи спрямовані на виявлення взаємозв'язку (кореляції) між значеннями швидкості вітру часового ряду. Методи даного класу прості, мають невелику обчислювальну складність і надають своєчасний прогноз. У багатьох додатках цих методів використовується різниця між передбаченим і реальним значенням швидкості вітру у найближчому минулому для налаштування параметрів моделей [41]. Також статистичні методи не вимагають ніяких додаткових даних крім попередньо збережених значень швидкості вітру. Однак точність прогнозу цих моделей значно зменшується при збільшенні дальності прогнозу. Статистичним моделям прогнозування швидкості вітру приділяється значна увага протягом останніх років. У число найвідоміших моделей входять: авторегресійна модель (AR), модель авторегресії – змінного середнього (ARMA), інтегрована модель авторегресії – змінного середнього (ARIMA), моделі експоненційного згладжування та інші [42].

2.1.4. Методи МСР

Серед статистичних методів можна виділити особливий клас методів, спрямованих на прогнозування вітряної енергії цільової місцевості на підставі наявних довгострокових даних з довколишніх метеорологічних станцій – методи МСР [43]. Технологія МСР ґрунтується на побудові кореляції тимчасового ряду вимірювань швидкості вітру цільової місцевості і вимірами, наявними на прилеглих метеорологічних станціях. Період усереднення даних цільової місцевості береться рівним періоду даних з метеорологічних станцій. Методи МСР розрізняються за технологією побудови кореляції між даними. У найпростішому випадку для визначення

взаємозв'язку даних використовується лінійна регресія. Коефіцієнти розраховуються для кожного з дванадцяти 30-ти градусних секторів, відповідних напрямку вітру, і корекцій для цільової місцевості, які застосовуються до довгострокових даних з метеорологічних станцій. Це дозволяє використовувати довгострокові дані зі станцій для оцінки того, якою була швидкість вітру на цільовій місцевості протягом певного проміжку часу у минулому, наприклад, протягом 20-ти попередніх років. Ці оцінки і використовуються в подальшому для передбачення швидкостей вітру. Також для побудови кореляції використовуються: розподіл Вейбулла, матричний метод, метод індексу вітру [43]. Технологія МСР має на увазі установку на місцевості вишок з анеморумбометрами, які будуть фіксувати поточну швидкість вітру. Необхідно накопичити вимірювання як мінімум за 6 місяців, після чого можна пробувати корелювати дані з вимірами з метеорологічних станцій, але чим більше даних буде накопичено, тим надійніше буде результат. Методи МСР використовуються для прогнозування вітряних ресурсів на довгостроковий період і вимагають наявності сильних кореляційних зв'язків між даними з цільової місцевості і даними метеорологічної станції. Відомі також деякі недоліки технології МСР:

- поблизу цільової місцевості (близько 50-100 км) може не виявитися придатних метеорологічних станцій (зі схожими кліматичними параметрами місцевості);
- враховуючи конструкцію сучасних вітряних турбін, на цільовій місцевості необхідно встановлювати високі метеорологічні вишки, що може потребувати відповідного дозволу на будівництво;
- отримані з метеорологічних станцій дані не завжди можуть бути належної якості – вони можуть містити пропуски;
- передбачається, що дані за попередній довгостроковий період х цільової місцевості, оцінені на підставі наявних 34 довгострокових даних в

минулому зі станцій і їх кореляції з виміряними за деякий проміжок даними на цільовій місцевості, достовірні;

- зазвичай методи МСР допускають, що розподіл напрямку вітру на цільовій місцевості і метеорологічної станції однаковий, що може вносити суттєві помилки в прогноз.

2.1.5. Методи штучного інтелекту

З розвитком штучного інтелекту, для прогнозування швидкості вітру стали застосовуватися методи ШІ. Нові розроблені підходи цього напрямку включають в себе: штучні нейронні мережі, адаптивну мережу на основі системи нечіткого виведення (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System), нечітку логіку (Fuzzy Logic), метод опорних векторів (Support Vector Machine), нейро-нечіткі мережі (Neuro-Fuzzy Network) і еволюційні алгоритми оптимізації (Evolutionary Optimization Algorithm). В рамках прогнозування вітряних ресурсів найчастіше використовуються методи ШНМ. Методи ШНМ можуть виявити складний нелінійний зв'язок та залежності між значеннями швидкості вітру в процесі навчання.

2.1.6. Гібридні методи

Мета гібридних методів полягає в тому, щоб отримати максимальну вигоду з кожного методу і отримати найоптимальніший прогноз. Гібридні методи комбінують різні підходи (наприклад, статистичні та фізичні) і різні моделі (наприклад, короткострокову модель і модель середньої дальності прогнозу). Аналітики можуть встановлювати взаємозв'язок між різними моделями або коригувати їх параметри, застосовуючи будь-яку додаткову інформацію, яка впливає на прогноз. В рамках прогнозування вітряних ресурсів це можуть бути дані про раптову зміну погодних умов, передані в ІСУ з довколишніх метеорологічних станцій.

За даними [44] найчастіше використовуються моделі, засновані на статистичному підході, або гібридні моделі, які включають в себе

статистичні методи в якості складової. Однак моделі на основі штучних нейронних мереж (клас методів штучного інтелекту) також набирають популярність.

2.2. Прототипування методів

Прототипування обраних методів може проводитися за наступною методикою:

- будується модель передбачення на основі частини вихідних даних;
- проводиться аналіз адекватності побудованої моделі;
- побудована модель застосовується для прогнозування майбутніх значень;
- прогнозовані значення порівнюються з дійсними і розраховуються похибки прогнозу.

Перевірка моделі на адекватність проводиться за допомогою:

- побудови коррелограмми залишків моделі (автокореляційної функції);
- Q-тесту Льюнг-Боксу [45];
- візуальної оцінки графіка залишків моделі;
- порівняння розподілу похибок моделі з нормальним розподілом.

2.3. Критерії оцінки точності прогнозування

Точність прогнозу може бути оцінена правдиво при виконанні реальних прогнозів. Некоректно дивитися тільки на те, наскільки добре модель відповідає історичним значенням, на яких вона будувалася. Необхідно досліджувати, наскільки успішно модель працює на нових даних, які не використовувалися для її побудови. І вже на прогнозах нових даних можна робити оцінку точності методу прогнозування.

Ефективність методів прогнозування вимірюється різними показниками, пов'язаними з похибками прогнозу. Більші значення похибок відповідають меншій точності прогнозу. У цьому розділі наведено визначення та рівняння для показників ефективності, які зазвичай використовуються для обчислення похибки прогнозу.

Для оцінки точності прогнозу зазвичай використовуються наступні похибок: ME, MSE, NMSE, RMSE, NRMSE, MAE, NMAE, MRE, MPE, MAPE [46].

Усі похибки ґрунтуються на типовій формулі абсолютної похибки:

$$e_i = y_i - \hat{y}_i, \quad (2.1)$$

де y_i – це i -е спостереження (дійсне значення), а \hat{y}_i – прогнозоване значення y_i -ого.

ME обчислюється за формулою:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n},$$

де n – кількість значень.

MSE обчислюється за формулою:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}.$$

NMSE обчислюється за допомогою нормування MSE:

$$NMSE = \frac{n \sum_{i=1}^n (e_i)^2}{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n y_i}.$$

RMSE обчислюється як корінь квадратний з MSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}}.$$

NRMSE обчислюється нормуванням RMSE:

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i}.$$

MAE ґрунтується на абсолютних похибках. Беручи до уваги формулу (1), MAE обчислюється за формулою:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}.$$

NMAE є нормалізованою версією похибки MAE:

$$NMAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|e_i|}{\max(x_i)},$$

де $\max(x_i)$ – найбільше значення з ряду спостережень.

Похибка MPE і MAPE є відносними. Вони ґрунтуються на співвідношенні:

$$p_i = 100e_i / y_i. \quad (2.2)$$

На відміну від похибок ME, RMSE і MAE, похибки MPE і MAPE не залежить від шкали даних і тому можуть бути використані для оцінки точності прогнозу на різному наборі даних.

Беручи до уваги (2), MAPE обчислюється за формулою:

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{e_i}{y_i} \right|.$$

Беручи до уваги (2), MPE обчислюється за формулою:

$$MPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{y_i}.$$

Будемо використовувати MAPE, яку надалі будемо називати «середньою відотною похибкою».

2.4. Прогнозна модель

Для прогнозування скористаємося моделлю динамічної системи у вигляді диференційного рівняння, що враховує попередні значення швидкості вітру. При цьому система може бути описана наступним рівнянням:

$$\frac{dv_{i+1}(t)}{dt} = \sum_j k_i v_{i-j},$$

де v_{i+1} – прогнозована швидкість вітру, v_{i-j} – попередні значення швидкості вітру, k_i – коефіцієнти рівняння.

Для вирішення рівняння скористаємося методами схеми «предиктор-коректор» та порівняємо ефективність їх використання з методом Ньютона.

2.5. Інтерполяційні формули Ньютона

Найпростіша задача інтерполяції полягає в наступному: на відрізку $[a; b]$ задана $n+1$ точка x_0, x_1, \dots, x_n x , які називають вузлами інтерполяції. Нехай функція $f(x)$ задана в рівновіддалених вузлах інтерполяції $x_0, x_1 = x_0 + h, \dots, x_n = x_0 + nh$ так, що:

$$f(x_0) = y_0, f(x_1) = y_1, f(x_2) = y_2, \dots, f(x_n) = y_n,$$

будується інтерполяційна функція $F(x)$, що приймає в вузлах інтерполяції ті ж значення, що і $f(x)$:

$$F(x_0) = y_0, F(x_1) = y_1, F(x_2) = y_2, \dots, F(x_n) = y_n.$$

У такій загальній постановці завдання може мати безліч рішень або не мати їх зовсім. Однак це завдання стає однозначним, якщо замість довільної функції $F(x)$ шукати поліном $P_n(x)$ степеню n такий, що:

$$P_n(x_0) = y_0, P_n(x_1) = y_1, P_n(x_2) = y_2, \dots, P_n(x_n) = y_n.$$

Отриману інтерполяційну формулу $y = F(x)$ зазвичай використовують для наближеного обчислення значень даної функції $f(x)$ в точках x , відмінних від вузлів інтерполяції. При цьому розрізняють інтерполяцію у вузькому сенсі, коли $x \in [x_0; x_n]$, і екстраполяцію, коли $x \notin [x_0; x_n]$. Многочлен $F_n(x)$, що задовольняє цим умовам, називається інтерполяційним, а відповідні йому формули – інтерполяційними [47].

Будемо шукати інтерполяційну функцію $F(x)$ у вигляді канонічного полінома степеня n :

$$F(x) = P_n(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n.$$

Яким би способом не будувався інтерполяційний поліном по заданому набору точок, результат завжди виходить один і той же (з точністю до помилок, що виникають при округленні дійсних чисел), оскільки через задані $n + 1$ точки проходить рівно один поліном n -го степеня.

Будувати інтерполяційний поліном можна за допомогою вирішення системи рівнянь, побудовою інтерполяційного многочлена Лагранжа, але зручніше за все застосовуючи інтерполяційну формулу Ньютона, з використанням скінченних різниць, оскільки функція задана дискретно. Інтерполяційна формула Ньютона має наступний вигляд:

$$P_n(x) = y_0 + \frac{\Delta y_0}{1!h}(x - x_0) + \frac{\Delta^2 y_0}{2!h^2}(x - x_0)(x - x_1) + \dots + \frac{\Delta^n y_0}{n!h^n}(x - x_0) \dots (x - x_{n-1})$$

де $\Delta y_0 = \Delta P_n(x_0) = f(x_1) - f(x_0) = y_1 - y_0 = \Delta y_0$ – скінченна різниця першого порядку многочлена $P_n(x)$ в точці x_0 ;

$\Delta^2 y_0 = \Delta^2 P_n(x_0) = \Delta y_1 - \Delta y_0$ – скінченна різниця другого порядку многочлена $P_n(x)$ в точці x_0 і т.д;

$\Delta^n y_0 = \Delta^n P_n(x_0) = \Delta^{n-1} y_1 - \Delta^{n-1} y_0$ – скінченна різниця порядку n многочлена $P_n(x)$ в точці x_0 ;

$\Delta^0 y = y_0$ – скінченна різниця нульового порядку.

На практиці формула Ньютона використовується в іншому вигляді. Увівши коефіцієнт $q = \frac{x - x_0}{h}$, де h – крок інтерполяції, q дорівнює числу кроків, отримаємо першу інтерполяційну формулу Ньютона:

$$P_n(x) = y_0 + q\Delta y_0 + \frac{q(q-1)}{2!}\Delta^2 y_0 + \dots + q(q-1)\dots\frac{q-n+1}{n!}\Delta^n y_0.$$

Першу інтерполяційну формулу Ньютона зручно використовувати на початку відрізка інтерполяції $[a; b]$.

Якщо за число кроків інтерполяції прийняти $n=1$, то отримаємо формулу лінійної інтерполяції:

$$P_n(x) = y_0 + q\Delta y_0.$$

При $n=2$ – формулу параболічної, або квадратичної, інтерполяції:

$$P_n(x) = y_0 + q\Delta y_0 + \frac{q(q-1)}{2!}\Delta^2 y_0.$$

Перша інтерполяційна формула Ньютона використовується для інтерполяції на початку відрізка $[a; b]$, тобто для інтерполяції вперед і екстраполяції назад. При інтерполяції вперед $q = \frac{x - x_0}{h} > 0$. При екстраполяції назад $q = \frac{x - x_0}{h} < 0$.

Для інтерполяції в кінці таблиці зазвичай застосовують другу інтерполяційну формулу Ньютона:

$$P_n(x) = y_n + q\Delta y_{n-1} + \frac{q(q+1)}{2!}\Delta^2 y_{n-2} + \dots + \frac{q(q+1)\dots(q+n-1)}{n!}\Delta^n y_0.$$

Друга інтерполяційна формула Ньютона використовується при інтерполяції в кінці таблиці, тобто для інтерполяції назад, коли $q = \frac{x - x_0}{h} < 0$, і для екстраполяції вперед, коли $q = \frac{x - x_0}{h} > 0$.

Похибка інтерполяції визначається формулою:

$$R_n(x) \frac{f^{(n+1)}(z)}{(n+1)!} (x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_n), x \in [a, b].$$

Використовуючи скінченні різниці, інтерполяційний многочлен можна записати в наступному вигляді:

$$P_n(x) = f(x_0) + f(x_0; x_1)(x-x_0) + f(x_0; x_1; x_2)(x-x_0)(x-x_1) + \dots + f(x_0; x_1; \dots; x_n)(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{n-1}),$$

де $f(x_0; x_1; \dots; x_n)$ - скінченна різниця порядку n . Враховуючи, що скінченні різниці – це константи, з даної форми інтерполяційного многочлена Ньютона можна легко визначити його порядок.

2.6. Методи схеми «предиктор-коректор»

Методи схеми «предиктор-коректор» (або методами прогнозу і корекції) в обчислювальній математиці називають групу методів чисельного вирішення різних завдань, у яких кожен крок складається з двох кроків [48]. Під час першого кроку (предиктор) обчислюється грубе початкове наближення шуканої величини. Даний крок виконується одноразово. Другий крок (коректор) уточнює це значення. Даний крок може виконуватися як одноразово, так і ітераційно необмежену кількість разів – для досягнення необхідної точності. Залежно від поєднання предиктора (способу розрахунку початкового наближення) і коректора (способу його уточнення) можуть бути отримані різні варіанти чисельних методів розв'язання задач розглянутого виду.

При використанні методів прогнозу і корекції при вирішенні звичайних диференціальних рівнянь можна отримати високу точність розрахунку. Найпростіше принцип прогнозу і корекції може бути реалізований за допомогою методів Адамса, в яких для розрахунку чергових величин y_{i+1} і f_{i+1} використовуються тільки раніше знайдені вузлові значення похідної f_j і останнє значення шуканої функції y_i .

Формули корекції набагато точніші, ніж формули прогнозу, а тому їх використання виправдано, хоч і пов'язано з додатковими обчисленнями (рис. 2.2) [48].

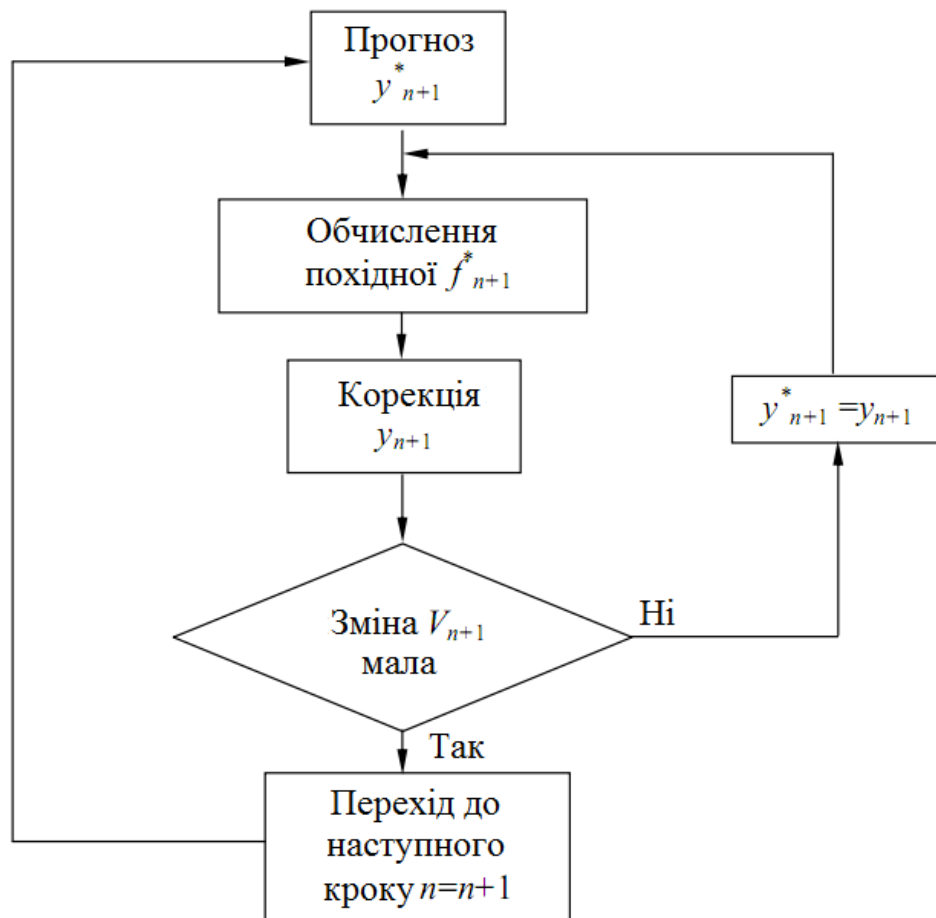


Рис. 2.2. Алгоритм методу прогнозу та корекції

Для отримання найбільшої точності обчислення, корекцію в методах прогнозу і корекції часто повторюють на одному і тому ж кроці кілька разів.

У порівнянні з однокроковими методами, методи прогнозу і корекції мають ряд особливостей:

- Для реалізації методів прогнозу і корекції необхідно мати інформацію про декілька попередніх точках. Тому вони не належать до числа методів, що самостартуються і починати рішення доводиться за допомогою будь-якого однокрокового методу. З цієї ж причини в процесі вирішення диференціальних рівнянь можна змінювати крок інтегрування.

- Однокрокові методи і методи прогнозу і корекції забезпечують приблизно однакову точність результатів, однак другі на відміну від перших дозволяють легко оцінити похибка на кроці.

- Застосовуючи метод Рунге-Кутта четвертого порядку, на кожному кроці доводиться обчислювати чотири значення функції, в той час як для забезпечення збіжності методу прогнозу і корекції того ж порядку точності достатньо двох значень функції. Тому методи прогнозу і корекції вимагають майже вдвічі менше машинного часу, ніж методи Рунге-Кутта порівнянної точності.

Методи, які використовують схему предиктора-коректора [49]:

- 1) метод Мілна;
- 2) методи Адамса (Адамса-Башфорта, Адамса-Моултона);
- 3) формули Гемінга;

Блок-схеми методів предиктора-коректора однакові (рис. 2.2) і відрізняються лише ітераційними формулами.

2.6.1. Метод Мілна

Згідно з рис. 2, покроково алгоритм метод Мілна можна описати наступним чином [50]:

- 1) за формулою предиктора обчислюється грубе значення y на правому кінці інтервалу: $y_{k+1} = y_{k-3} + \frac{4}{3} \cdot (2 \cdot f_k - f_{k-1} + 2 \cdot f_{k-2}) \cdot \Delta t$;

- 2) розраховується похідна у $k + 1$ точці: $f_{k+1} = f(t + \Delta t, y_{k+1})$;

- 3) знову розраховується y_{k+1} за уточненою формулою, використовуючи уже нове значення похідної у точці $k + 1$: $y_{k+1} = y_{k-1} + \frac{1}{3} \cdot (f_{k+1} + 4 \cdot f_k + f_{k-1}) \cdot \Delta t$;

- 4) розраховується похідна у $k + 1$ точці з урахуванням повторно порахованого точнішого значення y_{k+1} : $f_{k+1} = f(t + \Delta t, y_{k+1})$. Відбувається підрахунок ітерацій лічильником i : $i := i + 1$.

5) перевірка точності: $|y_{k+1}^i - y_{k+1}^{i+1}| \leq \varepsilon$, де верхній індекс $i+1$ означає, точніше наближення значення функції, ніж значення з індексом i ;

6) якщо умова виконана, і точність ε досягнута, то переходимо до кроку 6, інакше повертаємося до кроку 3 і процес уточнення повторюється з новими значеннями y та f , причому їх старе значення береться з попередньої ітерації;

7) підготовка до наступного кроку: зміна лічильнику часу t , зміна номеру кроку k :

$$t := t + \Delta t ;$$

$$k := k + 1.$$

8) перевірка кінця розрахунку: $t \leq T$. Якщо умова виконується, то розрахунок продовжується для наступної точки, та здійснюється перехід до кроку 1, інакше — кінець.

2.6.2. Методи Адамса

Розглянемо сімейство багатокрокових методів Адамса. Дані методи засновані на заміні вихідної функції f , її інтерполянтom [51]:

$$f(x, y(x)) = P_n(x).$$

У якості інтерполянта застосовується зворотня інтерполяційна формула Ньютона. Розрахунок значення y у вузлі сітки здійснюється інтегруванням інтерполянта в інтервалі від попереднього вузла сітки до шуканого:

$$y_{i+1} = y_i + \int_{x_i}^{x_{i+1}} P_n(x) dx. \quad (2.3)$$

Залежно від того, чи включається шуканий вузол (x_{i+1}, y_{i+1}) в побудову полінома чи ні, виходять сімейства явних (без шуканого вузла, методи Адамса-Башфорта) або неявних (методи Адамса-Моултона) методів Адамса. Порядок апроксимації методів Адамса на одиницю більше порядку інтерполуючого многочлена [52]:

$$p = n + 1.$$

Розглянемо декілька явних методів Адамса. Підставляючи в залежність (3) зворотню інтерполяційну формулу Ньютона і здійснюючи інтегрування маємо, при $n = 0$:

$$y_{i+1} = y_i + hf(x_i, y_i).$$

Що відповідає явному методу Ейлера. При $n = 1$:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2}(3f(x_i, y_i) - f(x_{i-1}, y_{i-1})).$$

Маємо явний двохкроковий метод Адамса. При $n = 2$:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{12}(23f(x_i, y_i) - 16f(x_{i-1}, y_{i-1}) + 5f(x_{i-2}, y_{i-2})).$$

Маємо явний трьохкроковий метод Адамса, і т.д. Для явних методів Адамса порядок апроксимації дорівнює кількості кроків методу:

$$p = k.$$

Аналогічним чином отримаємо декілька неявних методів Адамса. При $n = 0$:

$$y_{i+1} = y_i + hf(x_{i+1}, y_{i+1}).$$

Що відповідає неявному методу Ейлера. Видно, рівняння має y_{i+1} у лівій та правій його частині. Зазвичай це рівняння не вирішується, а значення в правій частині замінюється на розраховане за будь-якої явною формулою – наприклад, явною формулою Адамса. При $n = 1$:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{2}(f(x_{i+1}, y_{i+1}) + f(x_i, y_i)).$$

Що відповідає методу трапецій. При $n = 2$:

$$y_{i+1} = y_i + \frac{h}{12}(5f(x_{i+1}, y_{i+1}) + 8f(x_i, y_i) - f(x_{i-1}, y_{i-1})).$$

Маємо неявний двохкроковий метод Адамса, і т.д. Для явних методів Адамса порядок апроксимації, за винятком випадку $n = 0$, дорівнює:

$$p = k + 1.$$

Зазвичай під методом Адамса (Гемінга, Мілна) мають на увазі 4-кроковий варіант методу.

2.6.3. Метод Гемінга

Має 4-ий порядок точності. Формула прогнозу [53]:

$$y_{n+1} = y_{n-3} + \frac{4}{3} \cdot h \cdot (y'_n - y'_{n-1} + 2y'_{n-2}).$$

Формула корекції:

$$y_{n+1} = \frac{1}{8} \cdot [9y_n - y_{n-2} + 3h \cdot (y'_{n+1} + 2y'_n - y'_{n-1})].$$

Таким чином, розглянуті методи дозволяють виконувати прогнозування даних з заданою точністю.

Висновки до другого розділу

При прогнозуванні швидкості вітру найчастіше використовуються моделі, засновані на статистичному підході, або гібридні моделі, які включають в себе статистичні методи в якості складової, а також моделі на основі штучних нейронних мереж.

Ефективність методів прогнозування вимірюється різними показниками, пов'язаними з похибками прогнозу. Більші значення похибок відповідають меншій точності прогнозу. У цьому розділі наведено визначення та рівняння для показників ефективності, які зазвичай використовуються для обчислення похибки прогнозу.

Для оцінки точності прогнозу використаємо похибку MAPE (середню відносну похибку).

Для прогнозування скористаємося методами схеми «предиктор-коректор» та порівняємо ефективність їх використання з методом Ньютона, а точніше – другою інтерполяційною формулою Ньютона.

Методи схеми «предиктор-коректор» (або методами прогнозу і корекції) складається з двох кроків. Під час першого, одноразового, кроку

обчислюється грубе початкове наближення шуканої величини. Під час другого, що повторюється не одноразово, значення величини уточнюється для досягнення необхідної точності.

Використаємо наступні методи схеми «предиктор-коректор», що мають 4 порядок точності: метод Мілна, методи Адамса та формули Гемінга.

РОЗДІЛ 3. ПРОГНОЗУВАННЯ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ОБРАНИМИ МЕТОДАМИ

3.1. Результати прогнозування з використанням корегуючого алгоритму

В якості даних для побудови моделі було взято значення швидкості вітру в період з 19 лютого 2019 року по 27 лютого 2019 року у м.Київ (табл. 3.1) [54], з частотою в 1 годину.

Таблиця 3.1

Вихідні дані швидкості вітру

Час	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00
v , м/с	0	0	0	0	2	3	2	4
Час	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
v , м/с	4	5	6	6	6	7	7	6
Час	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
v , м/с	5	5	6	5	5	6	7	6
Час	01:00	02:00	03:00	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00
v , м/с	5	6	6	4	3	3	4	4
Час	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00
v , м/с	4	4	3	3	4	4	3	3
Час	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00
v , м/с	3	3	4	4	5	4	5	5

Прогнозування здійснювалося на 1, 3 та 6 годин вперед протягом 35 годин з інтервалом в 1 годину, результати прогнозування наведені на рис. 3.1 – 3.18. Синім кольором на рисунках позначено реальну швидкість вітру, червоним – прогнозовану, а зеленим – межу, починаючи з якої починалося прогнозування.

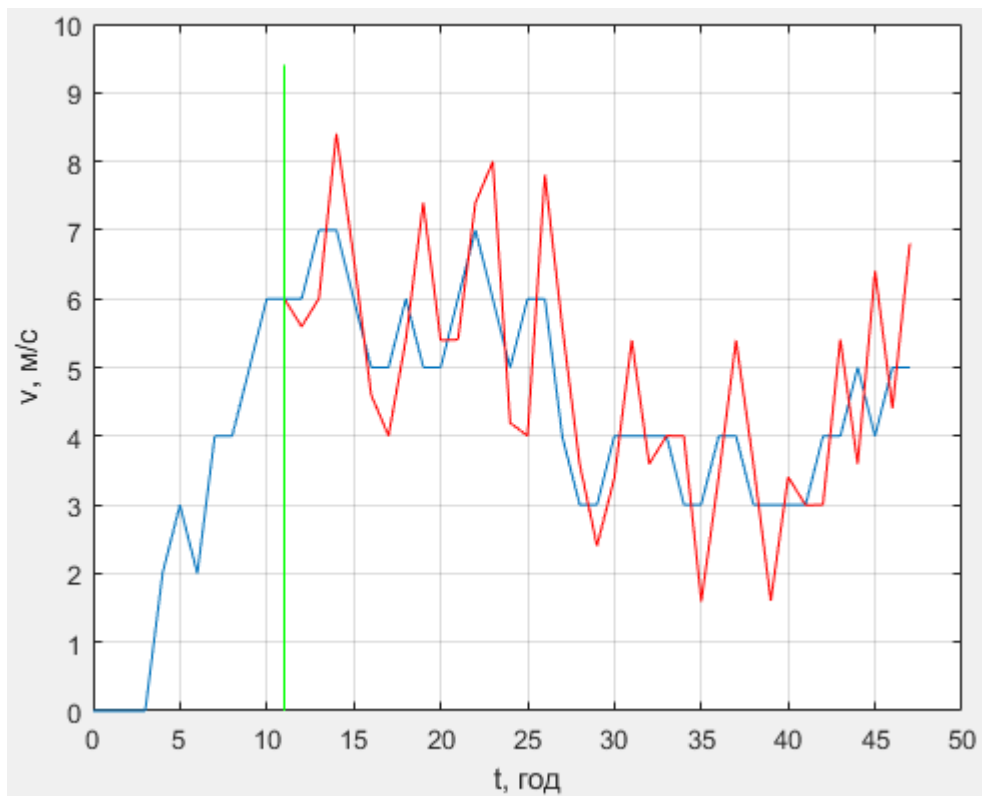


Рис. 3.1. Результати прогнозування методом Гемінга на 1 годину

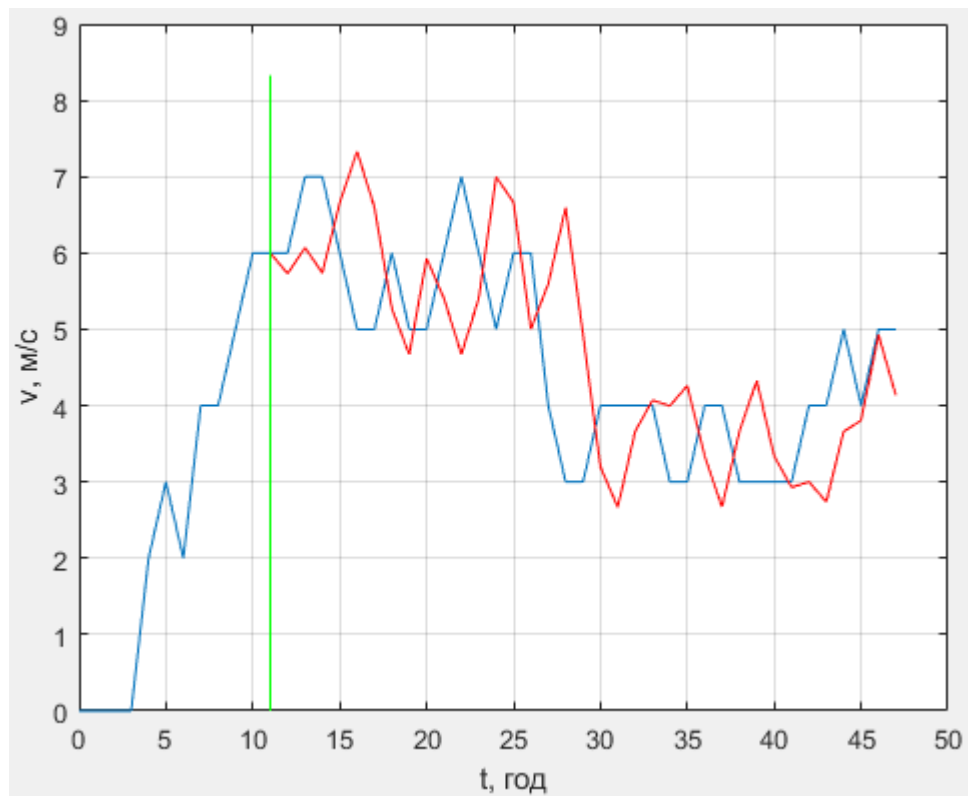


Рис. 3.2. Результати прогнозування методом Адамса на 1 годину

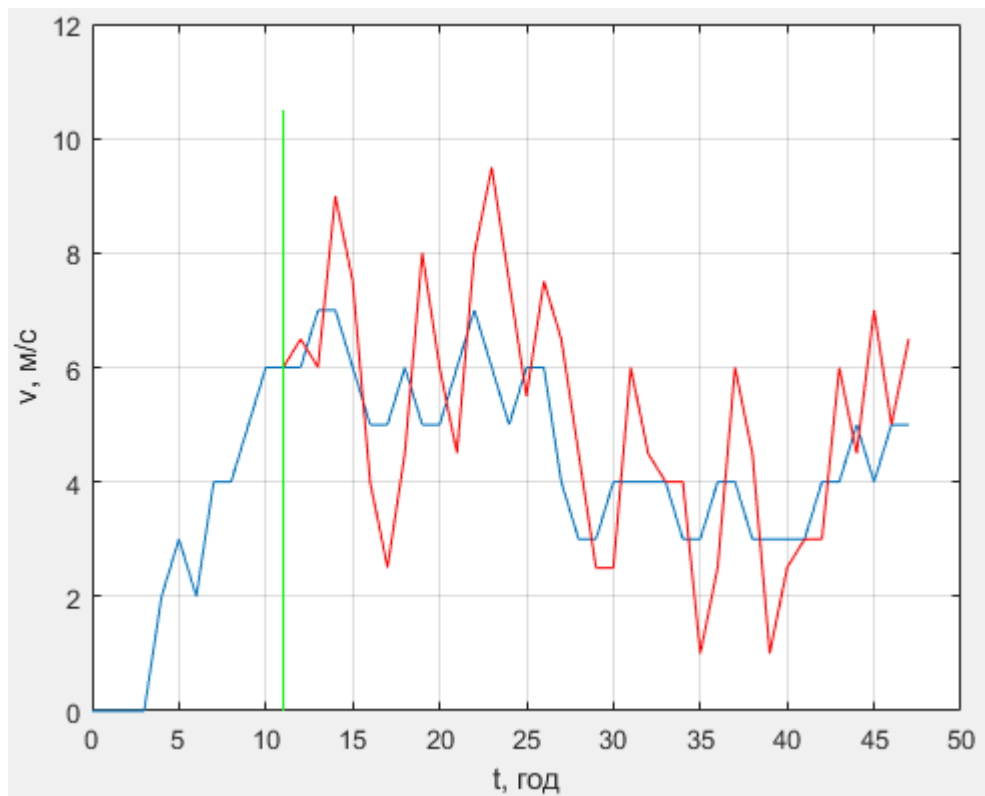


Рис. 3.3. Результати прогнозування методом Мілна на 1 годину

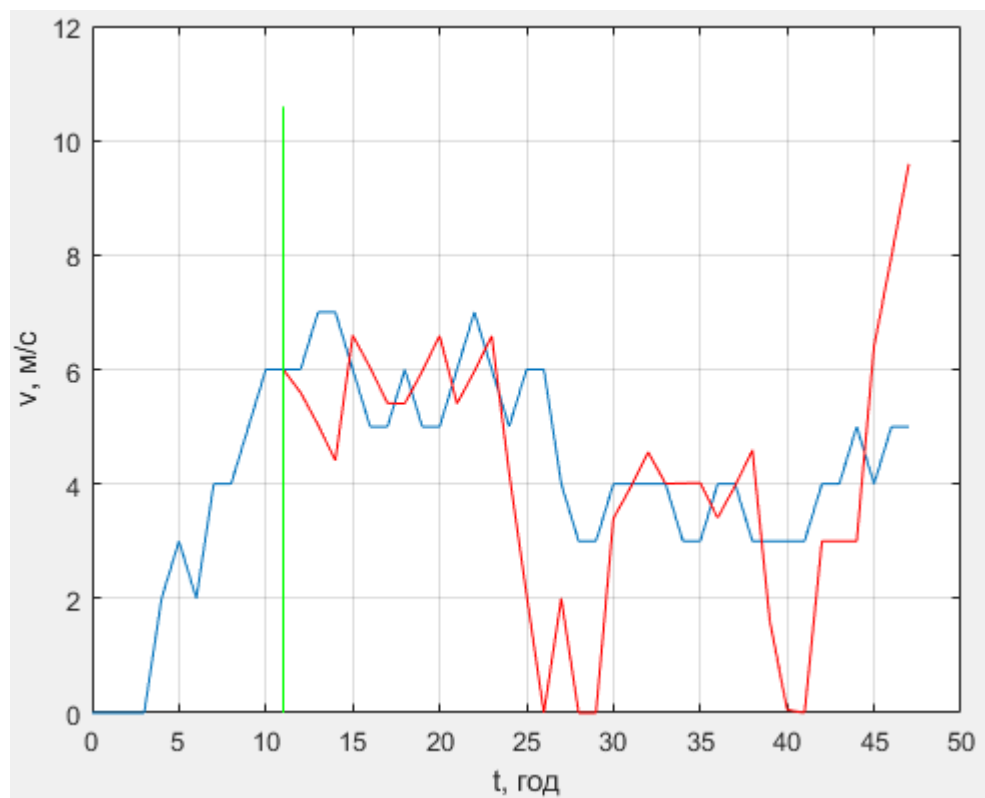


Рис. 3.4. Результати прогнозування методом Гемінга на 3 години

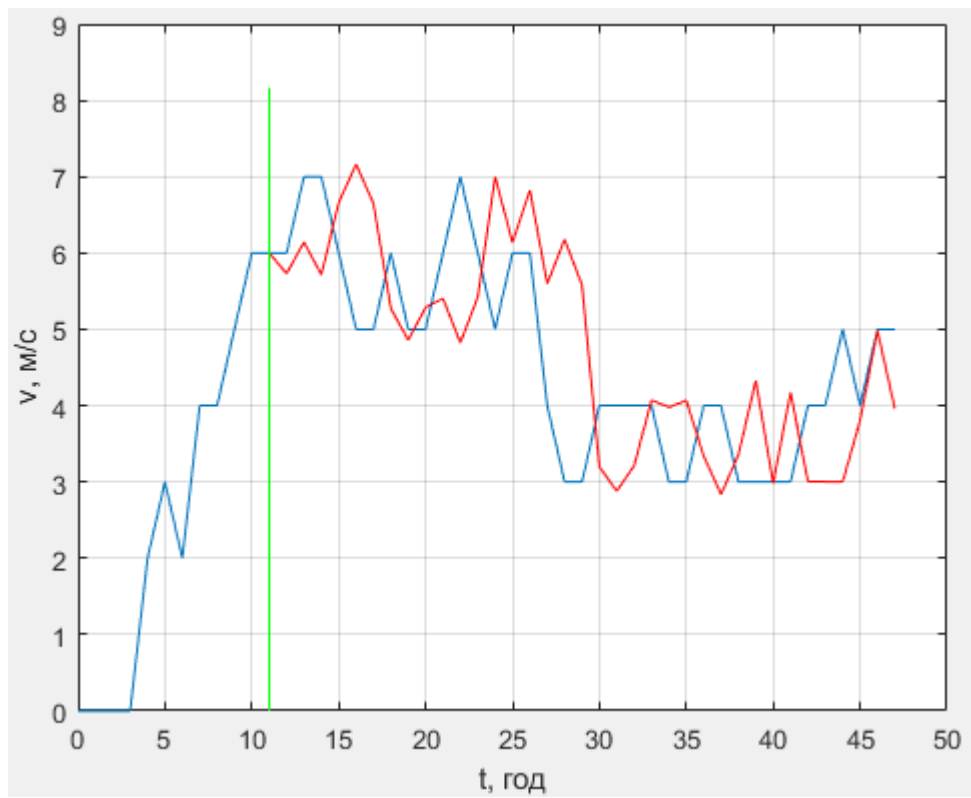


Рис. 3.5. Результати прогнозування методом Адамса на 3 години

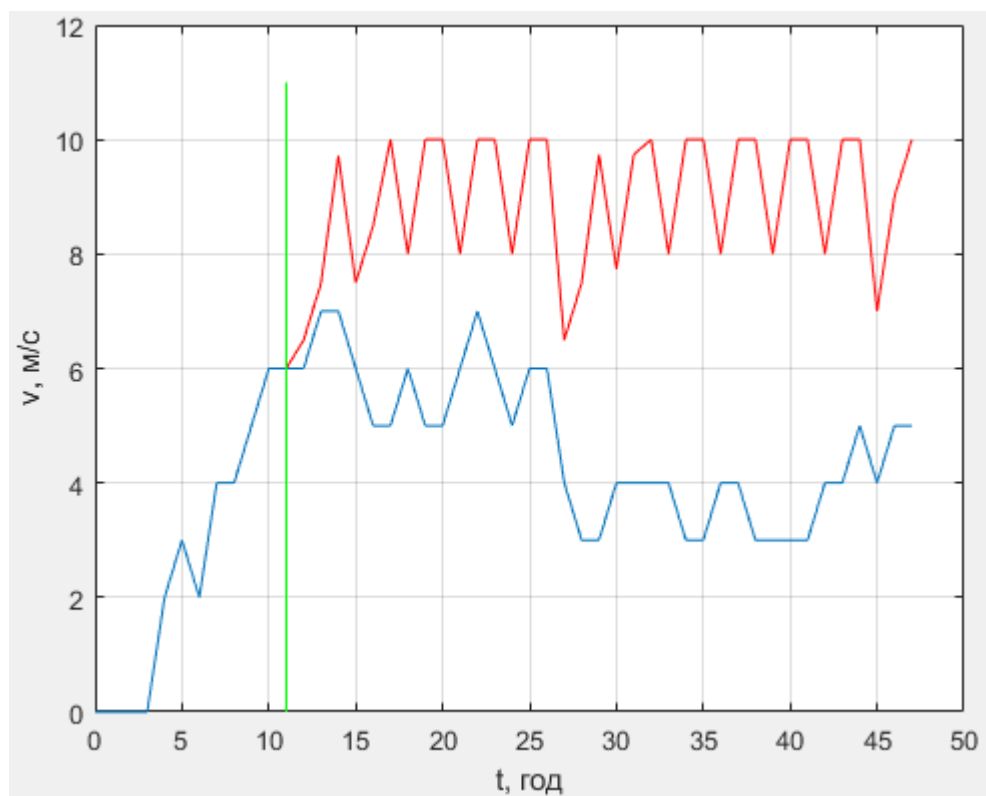


Рис. 3.6. Результати прогнозування методом Мілна на 3 години

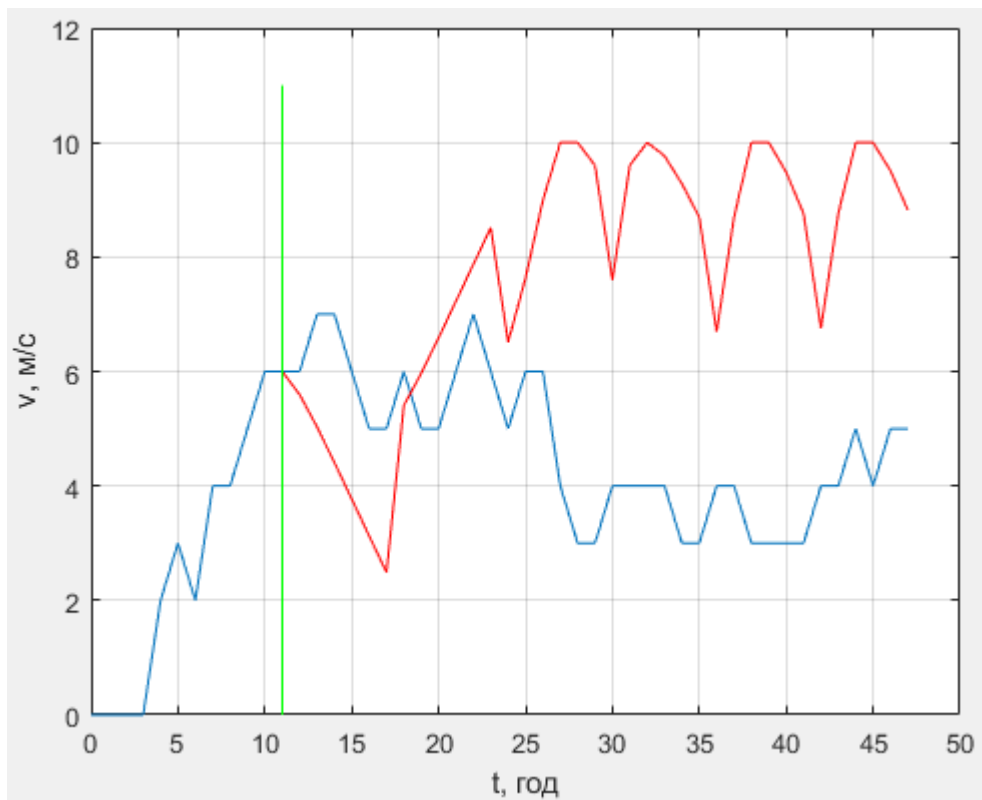


Рис. 3.7. Результати прогнозування методом Гемінга на 6 годин

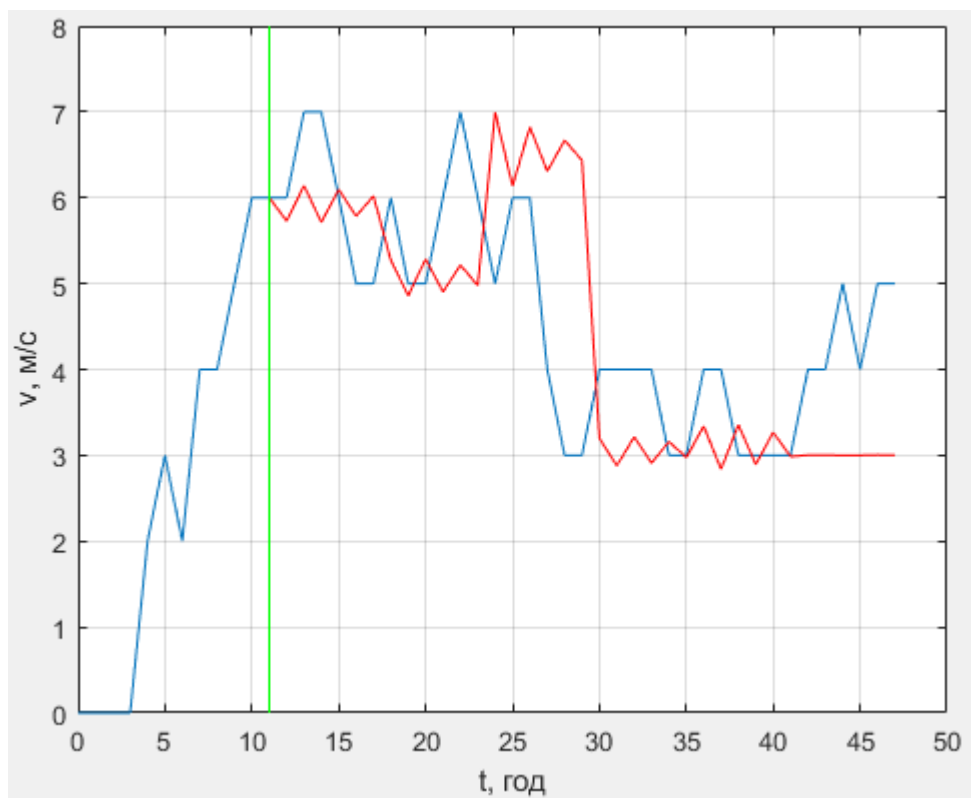


Рис. 3.8. Результати прогнозування методом Адамса на 6 годин

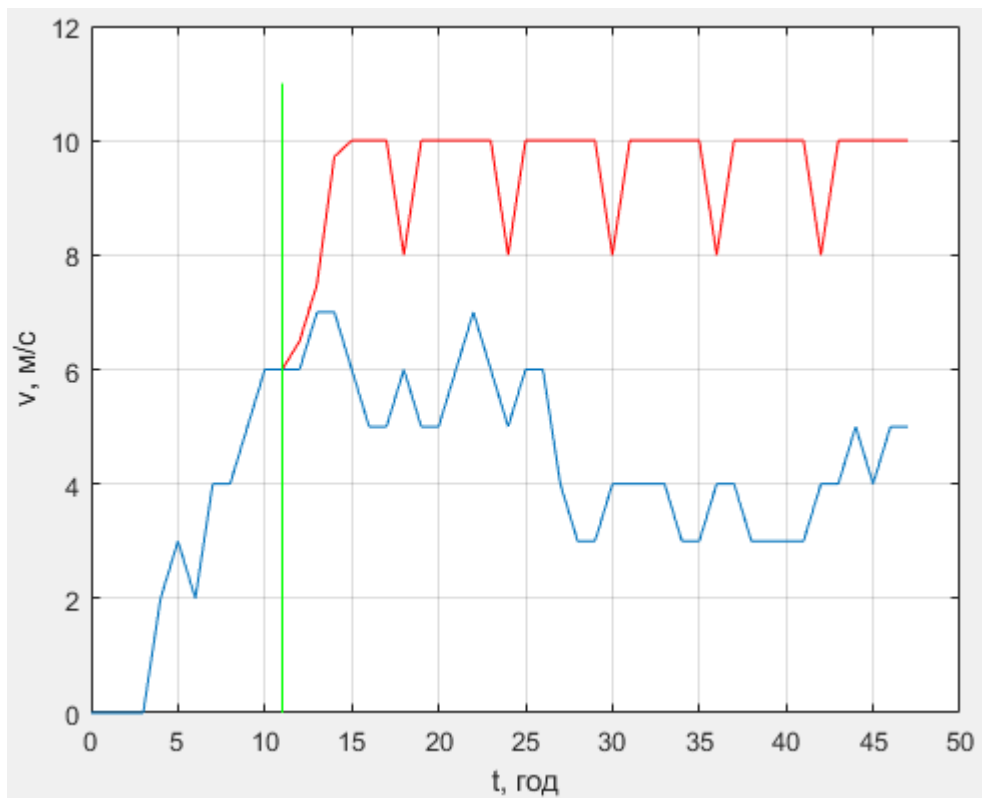


Рис. 3.9. Результати прогнозування методом Мілна на 6 годин

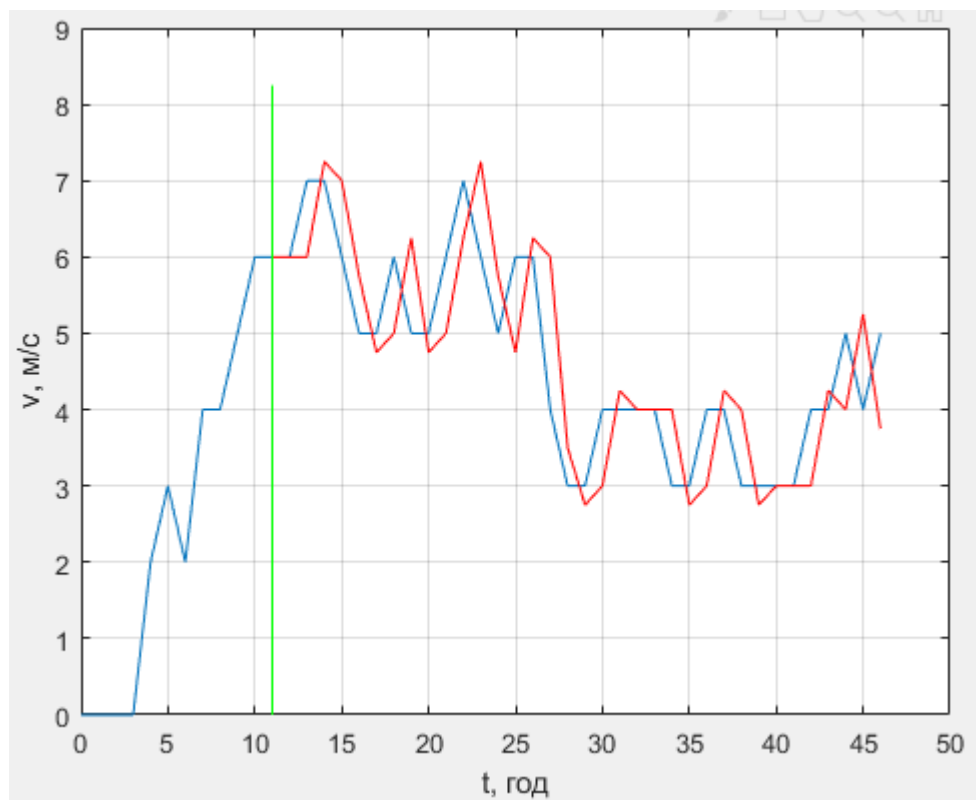


Рис. 3.10. Результати прогнозування методом Ньютона 1-го степеня на 1 годину

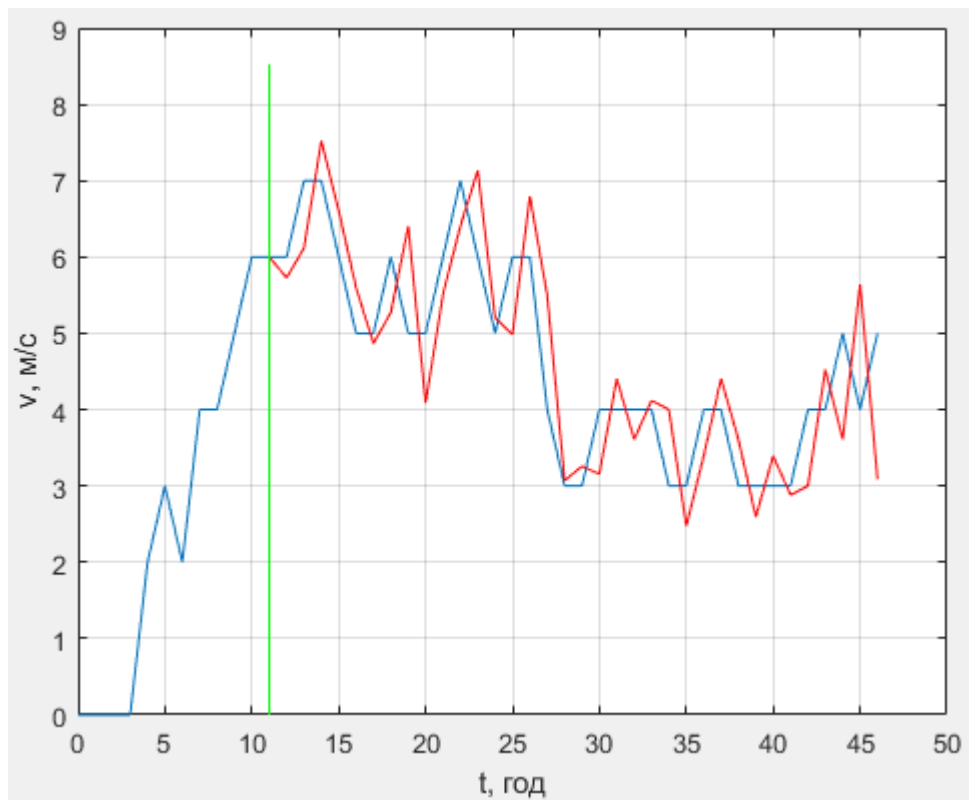


Рис. 3.11. Результати прогнозування методом Ньютона 3-го степеня на 1 годину

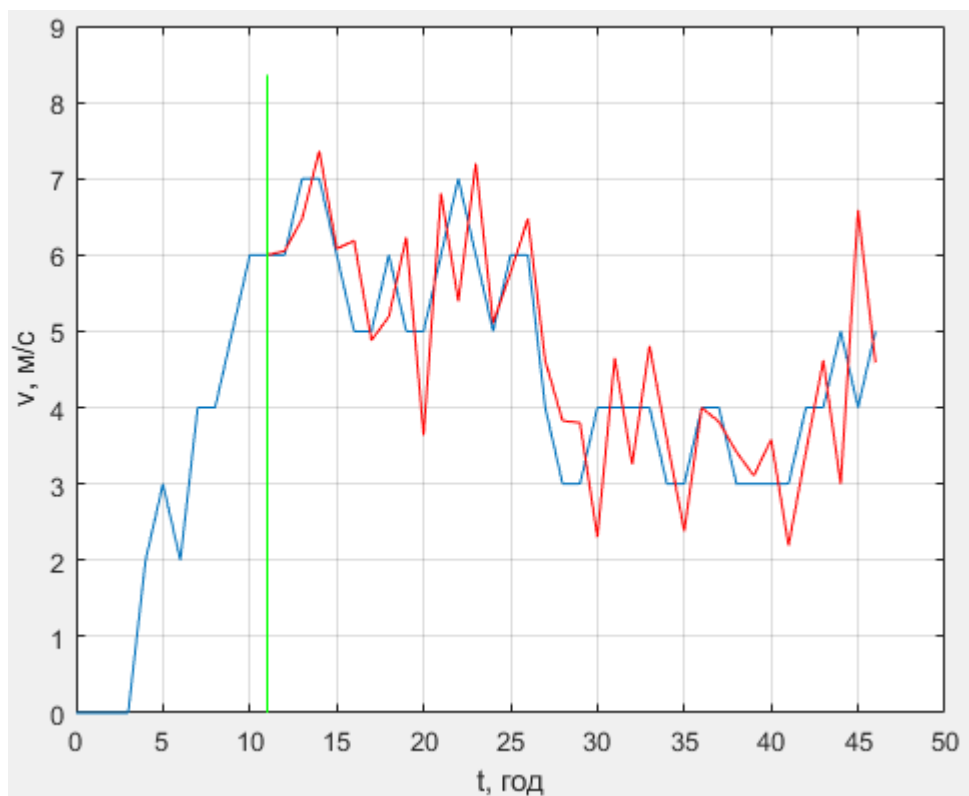


Рис. 3.12. Результати прогнозування методом Ньютона 5-степеня на 1 годину

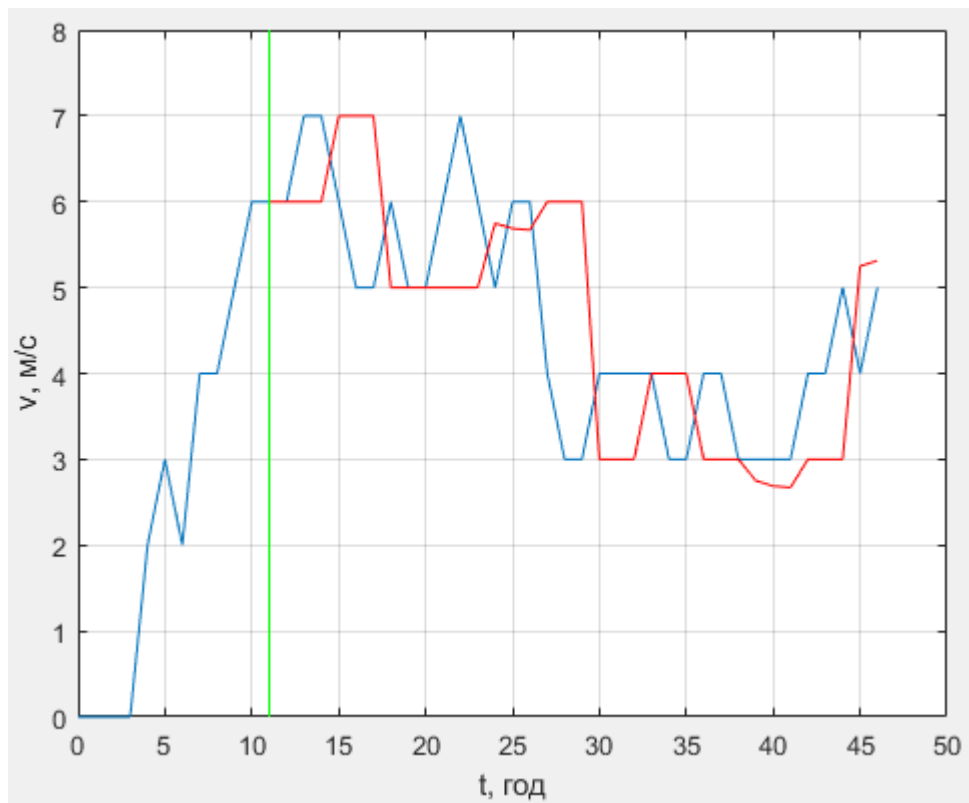


Рис. 3.13. Результати прогнозування методом Ньютона 1-го степеня на 3 години

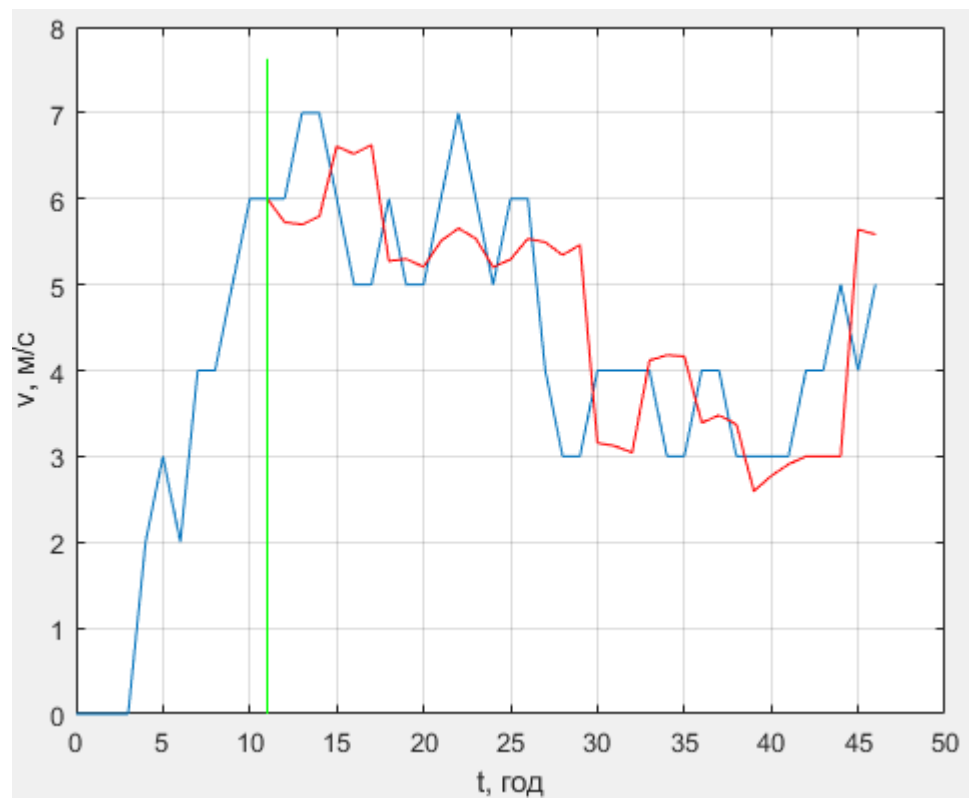


Рис. 3.14. Результати прогнозування методом Ньютона 3-го степеня на 3 години

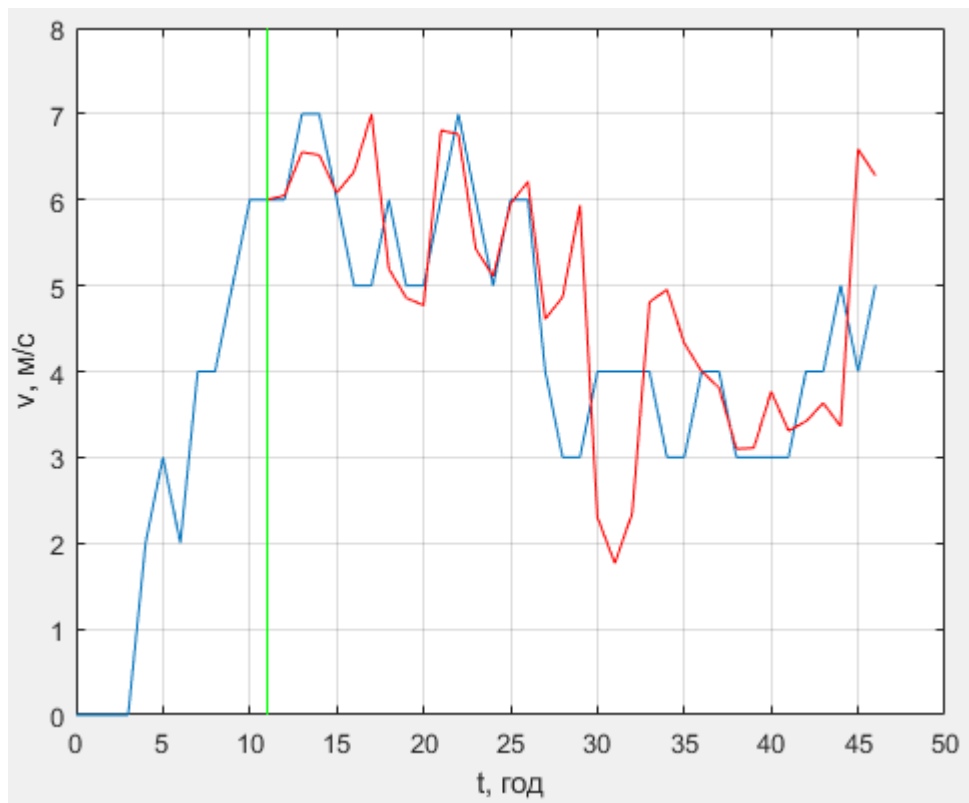


Рис. 3.15. Результати прогнозування методом Ньютона 5-го степеня на 3 години

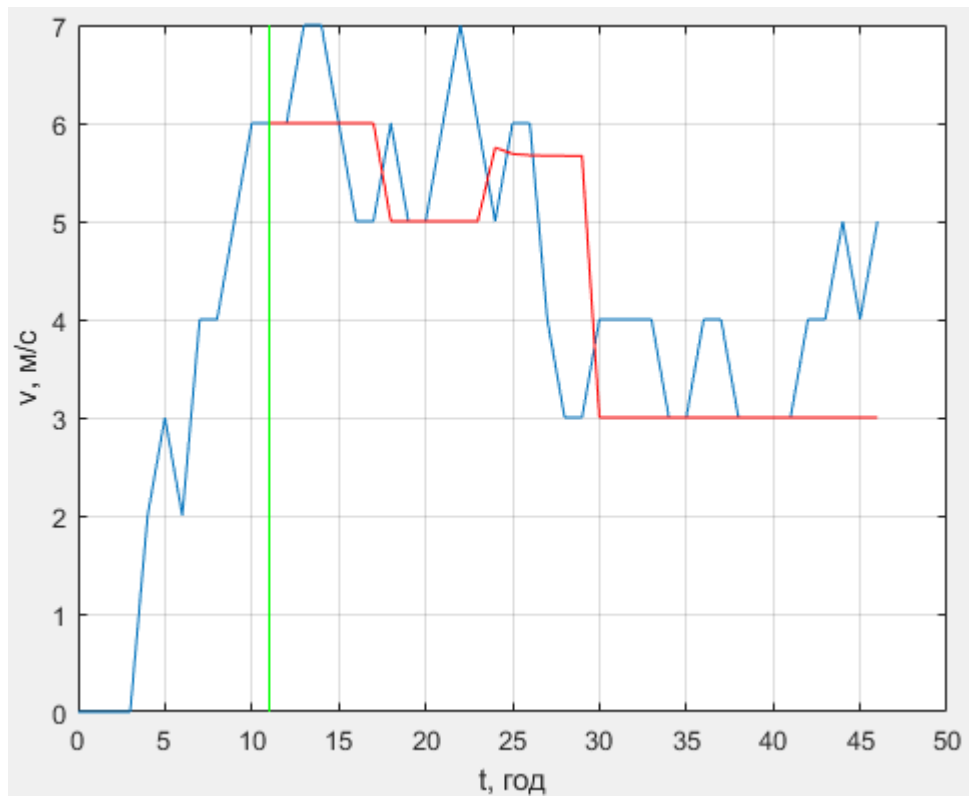


Рис. 3.16. Результати прогнозування методом Ньютона 1-го степеня на 6 годин

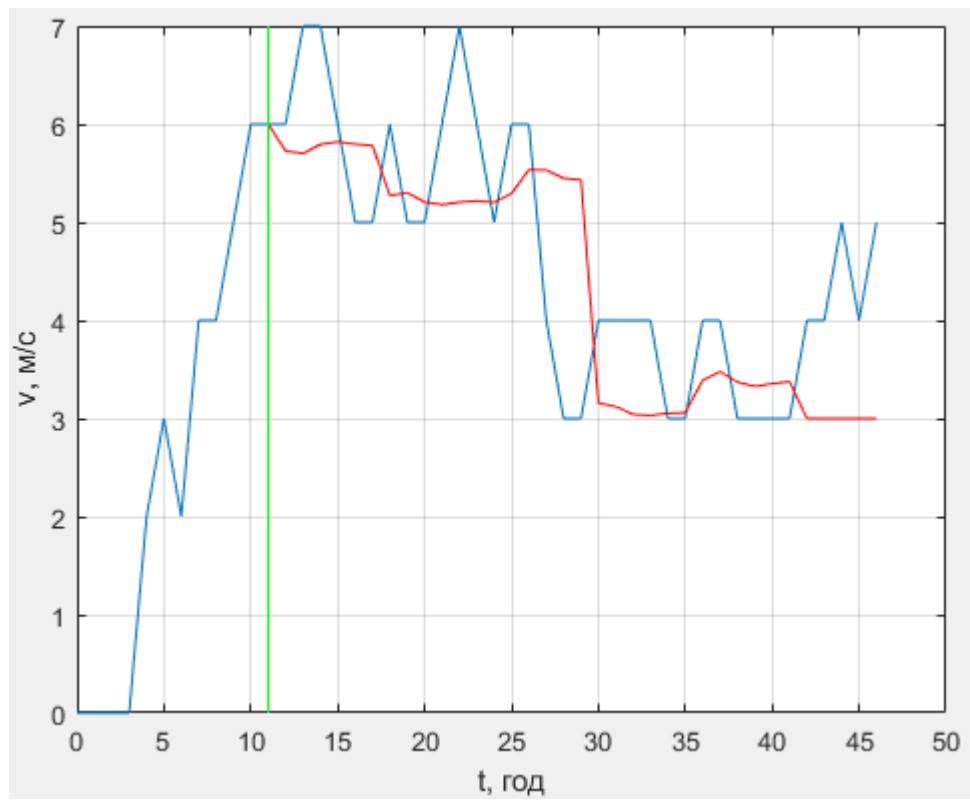


Рис. 3.17. Результати прогнозування методом Ньютона 3-го степеня на 6 годин

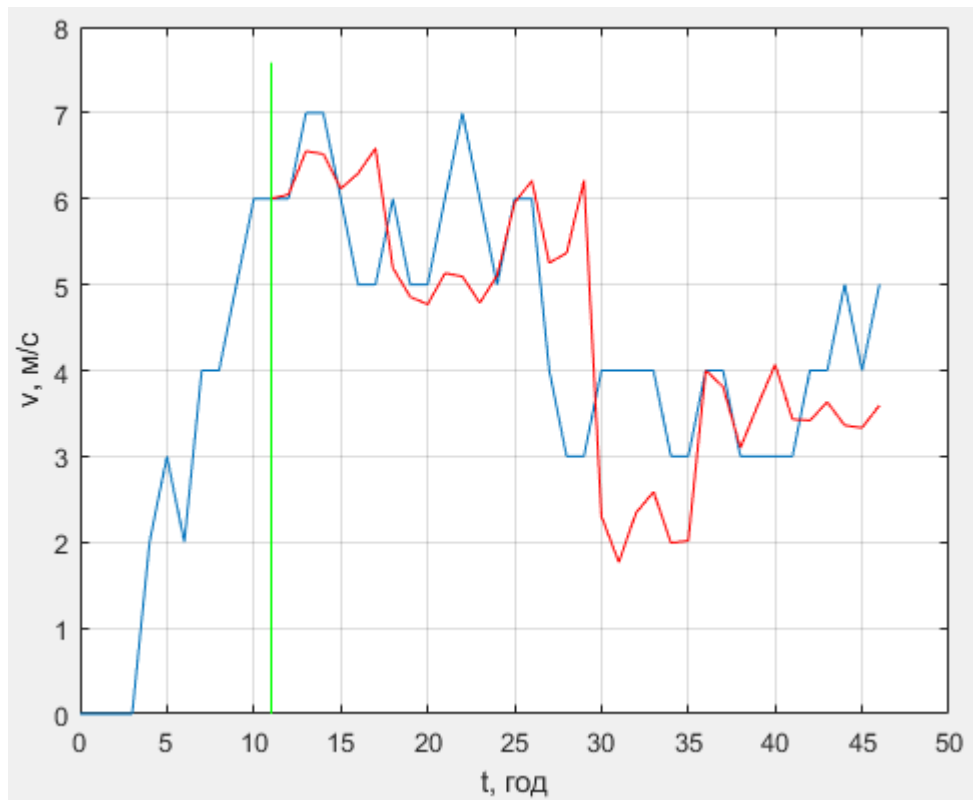


Рис. 3.18. Результати прогнозування методом Ньютона 5-го степеня на 6 годин

Прогнозування відбувалося з використанням корегуючого алгоритму, згідно з яким:

1) Обмежується швидкість наростання / спадання швидкості вітру – згідно з архівними метеоданими, швидкість вітру могла зростати або спадати максимум на 4 м/с, тому при перебільшенні цього показника він зменшується до 2 – половини від максимуму.

2) Обмежується мінімальна та максимальна швидкість вітру – мінімальна на рівні 0 м/с та максимальна на рівні 10 м/с (максимальна швидкість вітру за вибраний проміжок часу).

У залежності від місцевості, пори року, та метеоданих, взятих за певний останній період часу (наприклад, за тиждень), дані обмеження можуть змінюватися.

У табл. 3.2 наведено кількість ітерацій формули коректора у середньому потрібно для кожного методу за виключенням методу Ньютона, тобто, скільки разів її застосування було достатньо для досягнення заданої середньої точності в усіх точках прогнозування.

Таблиця. 3.2

Кількість ітерацій формул коректора

Дальність прогнозу	1 год.	3 год.	6 год.
Метод Адамса	6,3	5,7	5,5
Метод Гемінга	5,5	5,0	4,3
Метод Мілна	5,5	7,0	6,7

З табл. 3.2 видно, що найменшу кількість ітерацій, а відповідно і найменшу кількість обчислень серед методів схеми «предиктор-коректор» потребує метод Гемінга, а найбільшу – метод Мілна.

3.2. Порівняння результатів прогнозування з корегуючим алгоритмом та без

На рис. 3.19 зображено порівняння результатів без використання корегуючого алгоритму та з ним для методу Гемінга при прогнозуванні на 1 годину. З рис. 3.19 видно, що корегуючий алгоритм частково відрізає викиди швидкості вітру за рахунок обмеження максимальної похідної швидкості вітру на інтервалі в 1 годину.

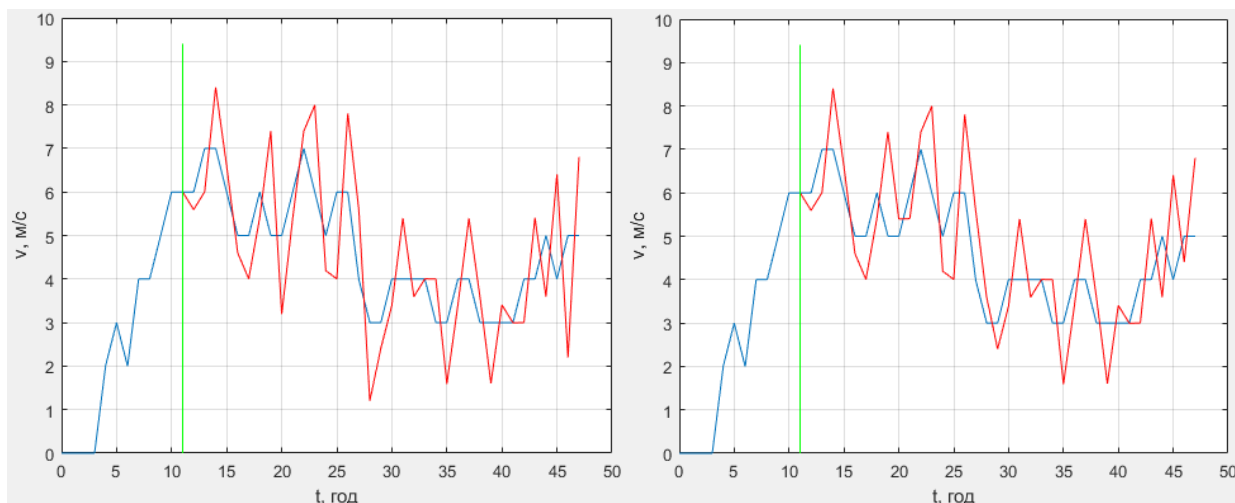


Рис. 3.19. Порівняння результатів прогнозування без корекції (зліва) та з нею (зправа) для методу Гемінга при прогнозуванні на 1 годину

У табл. 3.2-3.3 наведено порівняння отриманої середньої відносної похибки середнього значення швидкості вітру з використанням методів Гемінга, Адамса та методу Мілна при прогнозуванні на 1, 3 та 6 годин без використання корегуючого алгоритму та з ним відповідно.

Таблиця 3.2

Порівняння похибки середнього значення без корекції

Дальність прогнозу	1 год	3 год	6 год
Метод Гемінга	0%	15%	42%
Метод Адамса	4%	2%	2%
Метод Мілна	6%	48%	52%

Таблиця 3.3

Порівняння похибки середнього значення з корекцією

Дальність прогнозу	1 год	3 год	6 год
Метод Гемінга	1,4%	8,6%	25%
Метод Адамса	0,8%	0,1%	0,8%
Метод Мілна	2,4%	24,7%	47,4%

У табл. 3.4-3.5 наведено порівняння отриманої середньої відносної похибки миттєвих швидкості вітру з використанням методів Гемінга, Адамса та методу Мілна при прогнозуванні на 1, 3 та 6 годин без використання корегуючого алгоритму та з ним відповідно.

Таблиця 3.4

Порівняння похибки миттєвих значень швидкості вітру без корекції

Дальність прогнозу	1 год	3 год	6 год
Метод Гемінга	30,2%	58,7%	111,6%
Метод Адамса	22%	23,5%	25,7%
Метод Мілна	37,5%	142,8%	1000%

Таблиця 3.5

Порівняння похибки миттєвих значень швидкості вітру з корекцією

Дальність прогнозу	1 год	3 год	6 год
Метод Гемінга	23,5%	81,3%	85,8%
Метод Адамса	22%	23,3%	25,2%
Метод Мілна	28,8%	103%	121%

У табл. 3.6-3.7 наведено порівняння отриманої середньої відносної похибки середнього значення швидкості вітру з використанням методу Ньютона різних степенів (1-6) при прогнозуванні на 1, 3 та 6 годин без використання корегуючого алгоритму та з ним відповідно.

Таблиця 3.6

Порівняння похибки середнього значення швидкості вітру без корекції

Дальність прогнозу Степінь Полінома	1	2	3	4	5	6
1	0,3%	1,6%	3,2%	1,2%	0,3%	6,3%
2	0,3%	2,1%	3,5%	0,8%	0,5%	6,7%
3	0,3%	2,7%	3,2%	1,3%	0,5%	6,4%
4	0,3%	3,7%	2%	2,8%	0,2%	5,9%
5	0,3%	5,2%	0%	5,0%	1,0%	5,2%
6	0,3%	8%	2,3%	7,8%	4,2%	5,1%

Таблиця 3.7

Порівняння похибки середнього значення швидкості вітру з корекцією

Дальність прогнозу Степінь Полінома	1	2	3	4	5	6
1	0,2%	2%	2,5%	4,0%	1,1%	0,8%
2	0,1%	1,1%	2,1%	7,5%	2,3%	0,7%
3	1,0%	8,1%	1,0%	4,2%	2,4%	2,8%
4	0,3%	3,1%	2,6%	3,1%	0,4%	2,5%
5	3,5%	14,3%	1,3%	3,0%	7,8%	8,0%
6	6,1%	0,1%	5,3%	0,4%	13,5%	3,6%

У табл. 3.8-3.9 наведено порівняння отриманої середньої відносної похибки миттєвих значень швидкості вітру з використанням методу Ньютона різних степенів (1-6) при прогнозуванні на 1, 3 та 6 годин без використання корегуючого алгоритму та з ним відповідно.

Таблиця 3.8

Порівняння похибки миттєвих значень швидкості вітру без корекції

Дальність прогнозу Степінь Полінома	1	2	3	4	5	6
1	15,9%	17,8%	20,9%	20,0%	24,7%	25,0%
2	17,8%	19,9%	22,7%	22,0%	25,8%	26,9%
3	20,3%	23,0%	24,3%	24,4%	26,8%	28,6%
4	25,3%	28,2%	27%	28,0%	28,6%	31,4%
5	33,8%	35,7%	31,6%	33,3%	33,4%	35,9%
6	49,3%	50,2%	42,4%	43,6%	48,4%	45,9%

Табл. 3.9

Порівняння похибки миттєвих значень швидкості вітру з корекцією

Дальність прогнозу Степінь Полінома	1	2	3	4	5	6
1	15,5%	18,0%	20,3%	19,6%	20,9%	24,9%
2	17,3%	19,1%	21,1%	21,6%	24,3%	24,8%
3	19,0%	19,7%	22,7%	23,2%	25,8%	26,9%
4	22,5%	23,9%	24,8%	31,2%	28,5%	35,5%
5	26,8%	28,1%	28,3%	29,5%	32,0%	31,8%
6	30,8%	32,6%	42,3%	36,5%	41,5%	43,4%

З табл. 3.2-3.9 видно, що найкращі результати дають використання інтерполяційного поліному Ньютона та метод Адамса. Використання корегуючого алгоритму значно зменшує похибку прогнозування при використанні методів схеми «предиктор-коректор» та частково зменшує при використанні інтерполяційних поліномів Ньютона. Для усіх методів зі збільшенням дальності прогнозу характерне втрачання точності, найменше її втрачає метод Ньютона.

3.3. Результати прогнозування з використанням вихідних даних з більшою та з меншою дисперсією

Дослідимо точність прогнозування при використанні часового ряду швидкості вітру, що плавно змінюється з часом, тобто з низькою дисперсією. Для цього візьмемо дані з м. Базель за 7 грудня 2019р. [55] (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Вихідні дані швидкості вітру

13,14	17,03	16,66	20,19	20,72
20,72	21,39	23,07	23,18	22,61
24,01	24,88	24,14	23,13	21,66
19,86	17,58	18,17	23,53	29,08

На рис. 3.20-3.23 представлені результати прогнозування на основі вихідних даних, наведених у табл. 3.10.

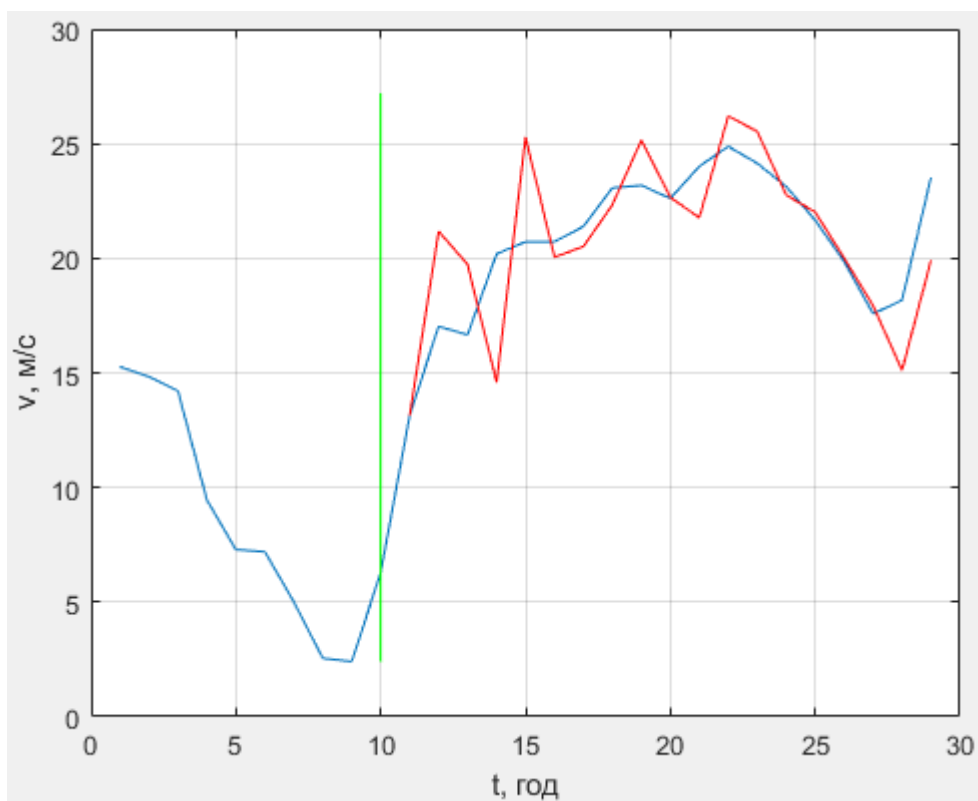


Рис. 3.20. Результати прогнозування методом Гемінга на 1 годину

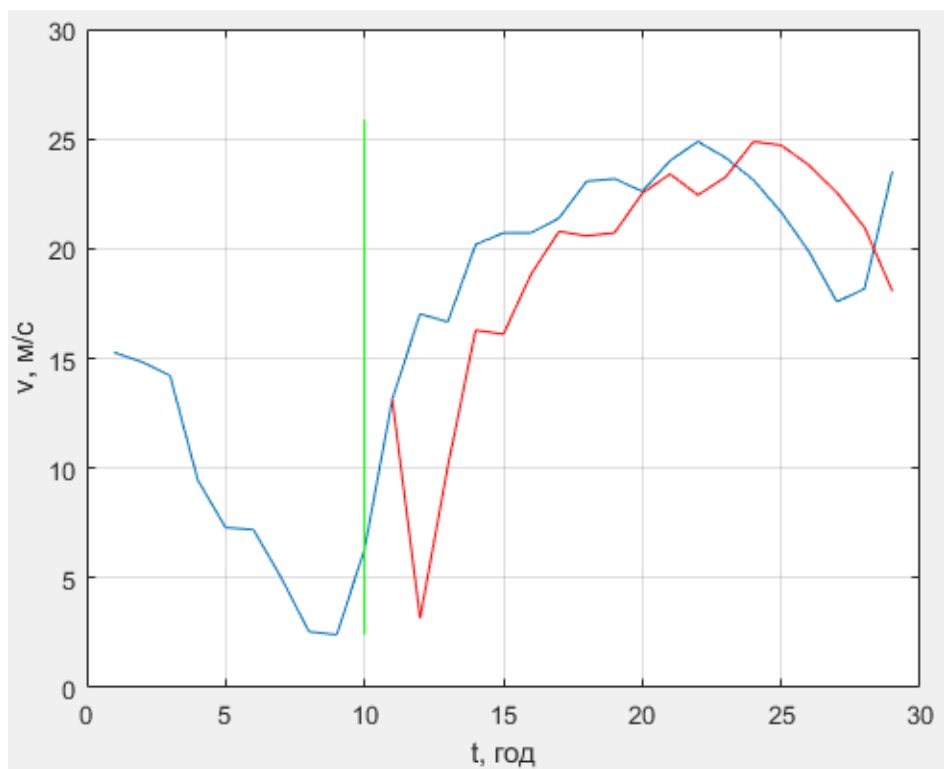


Рис. 3.21. Результати прогнозування методом Адамса на 1 годину

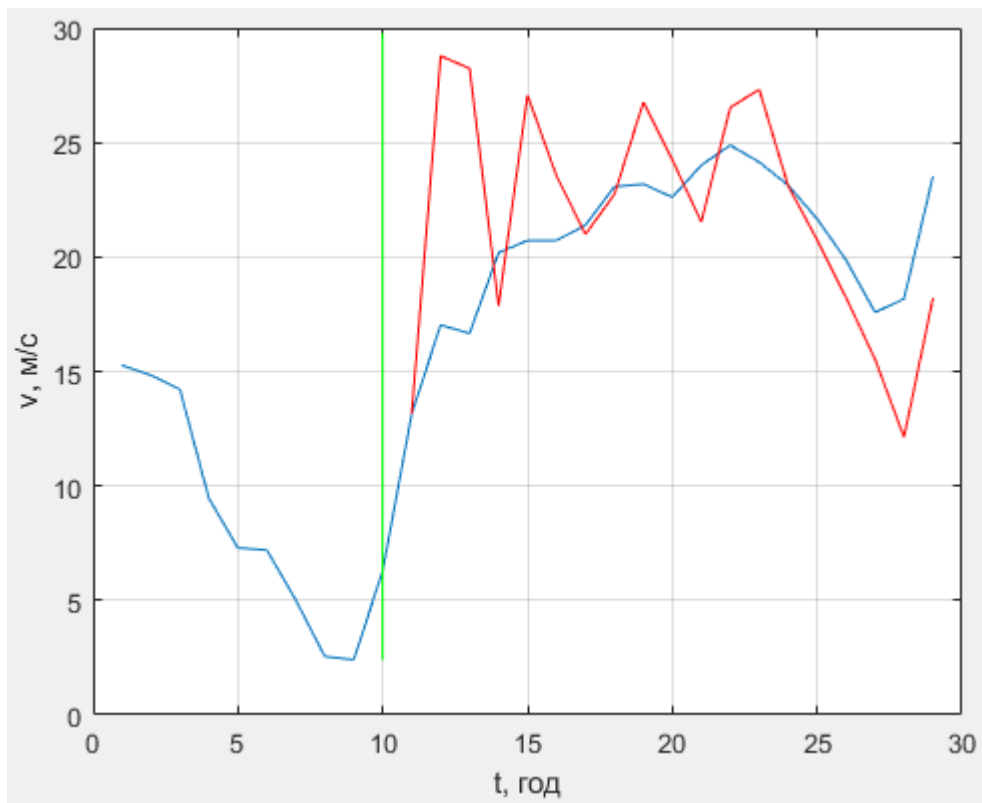


Рис. 3.22. Результати прогнозування методом Мілна на 1 годину

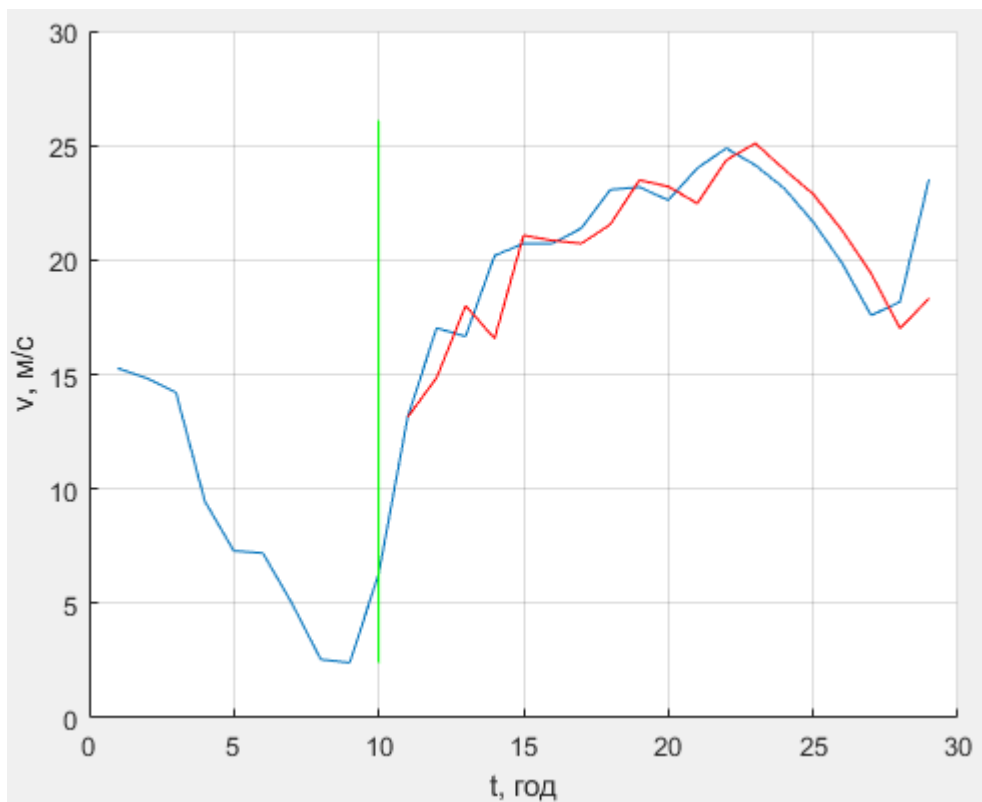


Рис. 3.23. Результати прогнозування методом Ньютона 4-го степеня на 1 годину

У табл. 3.11 зведено середні відносні похибки прогнозування на основі даних табл. 3.10.

Таблиця 3.11

Порівняння результатів прогнозування обраними методами

Метод прогнозування	Гемінга	Адамса	Мілна	Ньютона
Похибка	8,6%	14,1%	15,4%	6,5%

Дослідимо точність прогнозування при використанні часового ряду швидкості вітру з поривами та різкими змінами швидкості вітру, тобто з високою дисперсією. Для цього візьмемо дані з м. Базель за 7 грудня 2019р. [55] (табл. 3.12).

Таблиця 3.12

Вихідні дані швидкості вітру

13,16	15,78	11,27	9,69	11,12	12,48
15,39	18,17	23,53	29,08	34,32	29,80
18,72	5,09	7,99	2,04	6,64	13,03
18,17	23,46	25,70	27,14		

На рис. 3.25-3.27 представлені результати прогнозування на основі вихідних даних, наведених у табл. 3.12.

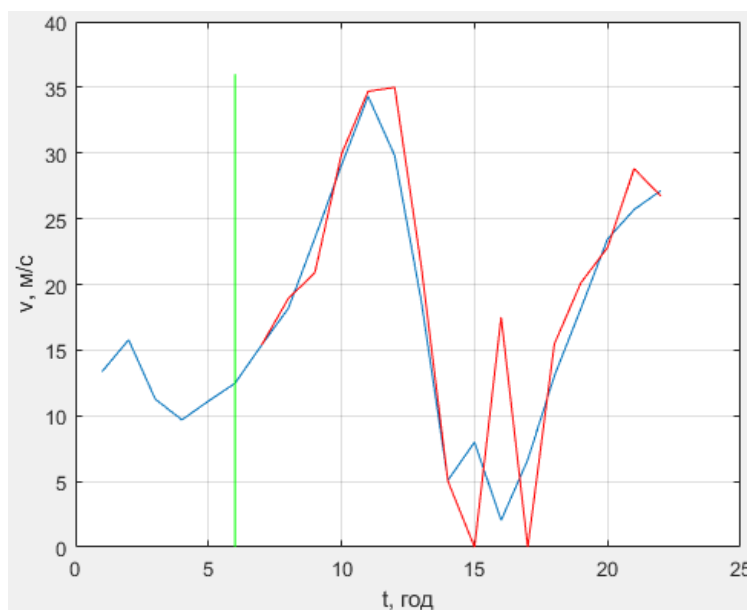


Рис. 3.24. Результати прогнозування методом Гемінга на 1 годину

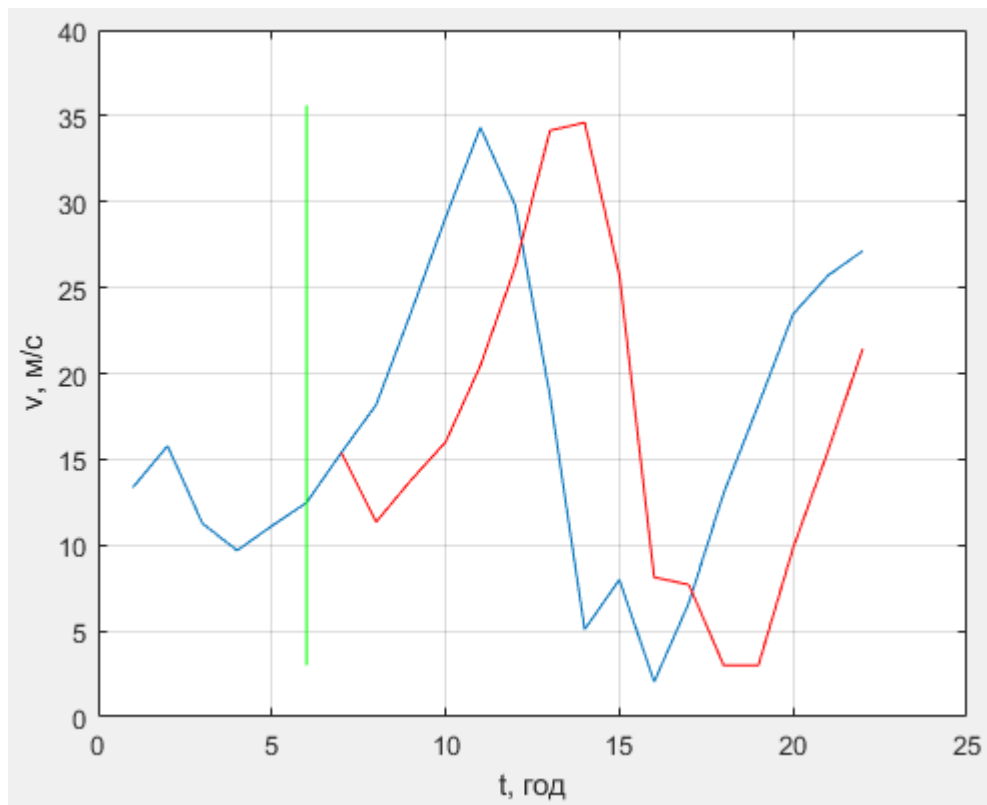


Рис. 3.25. Результати прогнозування методом Адамса на 1 годину

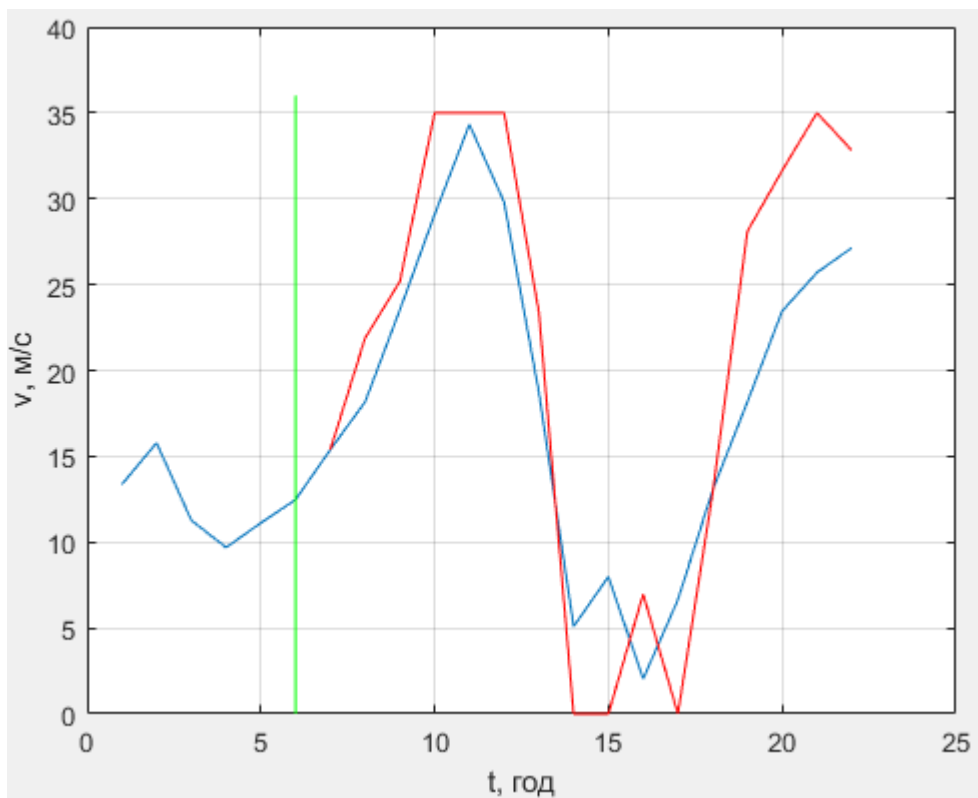


Рис. 3.26. Результати прогнозування методом Мілна на 1 годину

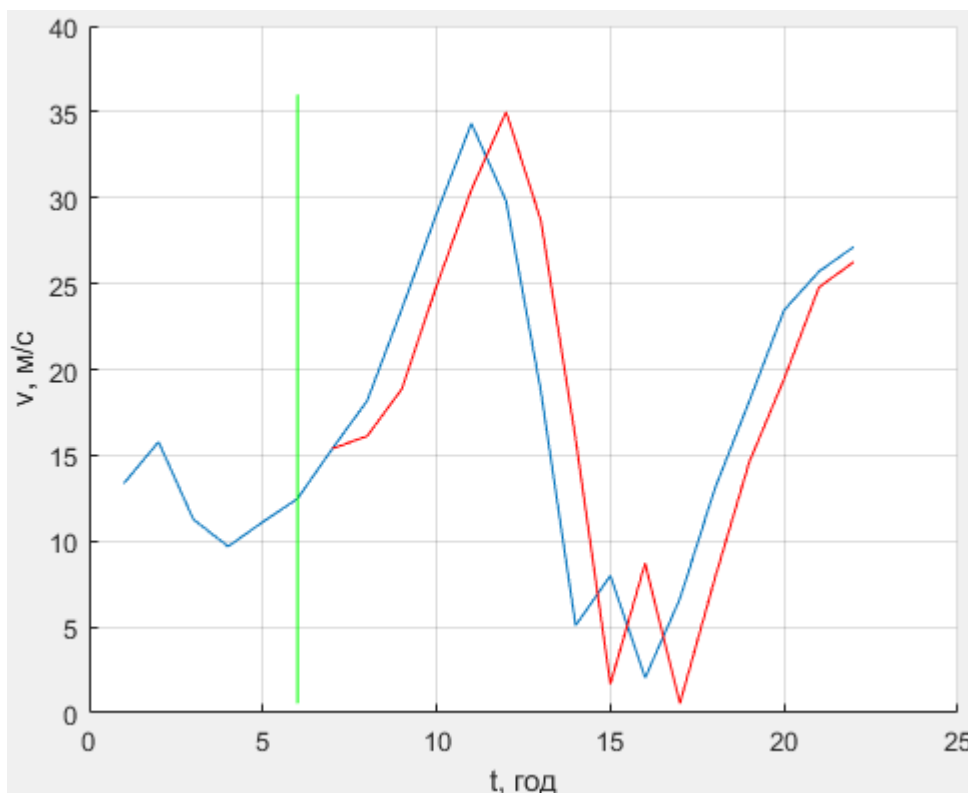


Рис. 3.27. Результати прогнозування методом Ньютона 1-го степеня на 1 годину

У табл. 3.13 зведено середні відносні похибки прогнозування на основі даних табл. 3.12.

Таблиця 3.13

Порівняння результатів прогнозування

Метод прогнозування	Гемінга	Адамса	Мілна	Ньютона
Похибка	7,5%	51,3%	27,5%	44,4%

З табл. 3.11 та 3.13 та рис. 3.20-3.27 можна зробити висновок, що при прогнозуванні часового ряду з низькою дисперсією найменшу похибку дають метод Гемінга та метод Ньютона, а при прогнозуванні поривів – Гемінга та Мілна. Враховуючи, що дані швидкості вітру м. Київ мають відносно невисоку або середню дисперсію на окремих інтервалах часу, тому при прогнозуванні найкраще себе показав метод Ньютона.

Висновки до третього розділу

Прогнозування відбувалося з використанням корегуючого алгоритму та без. Згідно з даним алгоритмом обмежується швидкість наростання / спадання швидкості вітру (максимум до 4 м/с, при перебільшенні цього показника – зменшується до 2 м/с) та обмежується мінімальна і максимальна швидкість вітру – 0 та 10 м/с відповідно. Дані обмеження можуть змінюватися у залежності від місцевості, пори року, та метеоданих, взятих за певний останній період часу.

При порівнянні кількості ітерацій формул коректора методів схеми «предиктор-коректор» найменшу кількість обчислень потребував метод Гемінга, а найбільшу – метод Мілна.

При порівнянні похибки прогнозування найменшу похибку дав метод Ньютона – 15,5% при прогнозуванні на 1 годину, а найбільшу – метод Мілна, 28,8%. Для усіх методів зі збільшенням дальності прогнозу характерне втрачання точності, найменше її втрачає метод Ньютона.

При прогнозуванні швидкості вітру з низькою дисперсією найменшу похибку забезпечили метод Гемінга та метод Ньютона, а при прогнозуванні поривів – методи Гемінга та Мілна, а метод Адамса при цьому показав середні результати відносно інших методів. Тому у залежності від статистичних параметрів швидкості вітру конкретної місцевості поряд з методом Ньютона можуть використовуватися і інші досліджені методи.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1. Етапи розроблення стартап-проекту

Стартап-проект (з англійської “start-up”) – це загальна назва для проекту, який має на меті вихід на ринок з унікальним продуктом або сервісом та існує зовсім недавно. Чіткого визначення терміну давності немає, але зазвичай він становить від декількох тижнів до декількох місяців. Після цього терміну проект в будь-якому випадку перестає бути стартапом, оскільки або отримує визнання і інвестиційну підтримку для продовження розвитку, або закривається як незатребуваний і неконкурентоспроможний [56,57].

Згідно з статистикою [58], 90% стартап-проектів провалюються, причому велика частка з них провалюється через некомпетентність, відсутність досвіду роботи колективі або досвіду у конкретній сфері та через особисті проблеми [59]. Одним з способів підвищити імовірність успіху є його планування, слідування етапам розроблення стартап-проекту.

Етапи розроблення стартап-проекту:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту.
2. Організація стартап-проекту.
3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту.
4. Заходи з комерціалізації проекту.

Під час маркетингового аналізу стартап-проекту:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;
- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

Під час організації стартап-проекту:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;
- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;
- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

Під час фінансово-економічного аналізу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);
- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

Етап комерціалізації проекту спрямований на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції. Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти [60].

Виконаємо маркетинговий аналіз стартап-проекту, що передбачає виконання наступних етапів:

1. Опис ідеї проекту.

2. Технологічний аудит ідеї проекту.
3. Аналіз ринкових можливостей запуску проекту.
4. Розроблення ринкової стратегії проекту.
5. Розроблення маркетингової програми проекту.
6. Висновки.

4.2. Опис ідеї проекту

В табл. 4.1 наведено опис ідеї проекту, а в табл.4.2 наведено визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї стартап-проекту.

Таблиця 4.1

Опис ідеї стартап-проекту		
Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення та реалізація методу прогнозування метеоданих	Промислова електроніка	Підвищення ефективності використання систем розосередженої генерації з відновлюваними джерелами енергії

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W слабка сторона	N нейтральна сторона	S сильна сторона
	Мій проект	Конкурент 1	Конкурент 2			
Можливість прогнозування на довільний період	+	-	-			+
Висока точність прогнозування	-	+	+	+		
Автоматичний підрахунок похибки прогнозування	+	-	-		+	

4.3. Технологічний аудит ідеї проекту

У табл. 4.3 наведена технологічна здійсненність ідеї стартап-проекту.

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

<i>Ідея проекту</i>	<i>Технології її реалізації</i>	<i>Наявність технологій</i>	<i>Доступність технологій</i>
Створення та реалізація методу прогнозування метеоданих	Розробка алгоритму, дослідження, програмування;	Наявна	Доступна

4.4. Аналіз ринкових можливостей запуску проекту

У табл. 4.4 наведена попередня характеристика потенційного ринку, а у табл. 4.5 – характеристика потенційних клієнтів.

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
Кількість головних гравців, од	5
Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	76
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Поступово зростає
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Масове розповсюдження у вигляді програмного забезпечення
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Згідно з ДСТУ
Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	70%

Таблиця 4.5

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
Підвищення ефективності використання систем розосередженої генерації та ВДЕ	Фізичні особи, електростанції, що використовують ВДЕ	Експлуатація згідно сертифікаційних правил	- до продукції: Ефективність Якість Надійність -до компанії-постачальника:

			Професіоналізм Чесність Порядність Технічна підтримка
--	--	--	--

У табл. 4.6 наведено фактори загроз, їх зміст та можлива реакція компанії.

Таблиця 4.6

Фактори загроз

<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
Збій програмного забезпечення	Наявність нових вірусів, що можуть занести зміни у прошивку ПЗ	Заміна пакету ПЗ
Невисока точність прогнозування	Пориви вітру важко прогнозувати, вони можуть негативно вплинути на якість прогнозування.	Покращення методу прогнозування та корегуючого алгоритму.

Фактори можливостей, їх зміст та можливу реакцію компанії наведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Фактори можливостей

<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
Якість діагностики системи	Якісно написане програмне забезпечення	Залучення

Результати ступеневого аналізу конкуренції на ринку наведено у табл. 4.8.

Таблиця 4.8

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Тип конкуренції: чиста	В кого краще - в того купують	Покращення товару та обслуговування
2. За рівнем конкурентної боротьби: локальна	Належить до вузького ринку збуту;	Розширення функціоналу та орієнтації користувачів
3. За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Притаманна лише в середині однієї галузі застосування.	Розширення функціоналу та галузей застосування
4. Конкуренція за видами товарів:	Відрізняється областю і дальністю прогнозу, а також	Розширення функціоналу ПЗ.

товарно-видова	його точністю.	
5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова	Чим дешевше – тим привабливіше; Чим краще – тим рентабельніше;	Покращення якості товару.
6. За інтенсивністю: не марочна	Не жорстка конкуренція	Не агресивні форми піару

У табл. 4.9 наведено обґрунтування факторів конкурентоспроможності.

Таблиця 4.9

Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
Ціна	Серед схожих по характеристикам систем обиратимуть ту, яка дешевше
Якість	Серед схожих по ціні систем обиратимуть яка має кращі характеристики
Відомість	При рівності двох перших факторів обиратимуть відоміший товар

У табл. 4.10 наведено результати порівняльного аналізу сильних та слабких сторін.

Таблиця 4.10

Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Windguru»

Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Windguru						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Ціна							+	
Якість				+				
Відомість				+				

У табл. 4.11 наведено результати аналізу слабких та сильних сторін проекту, а також можливості та загрози для нього.

Таблиця 4.11

SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: Алгоритм Оптимізоване програмне забезпечення, яке швидко працює, при цьому, не сильно завантажує оперативну пам'ять на ПК	Слабкі сторони: Невисока точність прогнозування.
Можливості:	Загрози:

Покращення алгоритму прогнозування.	Нові віруси, які «обходять» антивірус, можуть занести зміни у ПЗ. Пориви вітру можуть погіршити якість прогнозування.
-------------------------------------	---

4.5. Розробка маркетингової програми проекту

Для розробки маркетингової програми стартап-проекту спочатку необхідно визначити базову стратегію конкурентної поведінки, Результати якої наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
Ні	Так	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

У табл. 4.13 визначено ключові переваги концепції потенційного товару для споживачів, тобто, вигоду, яку пропонує для них дана система.

Таблиця 4.13

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
Підвищення ефективності використання систем розосередженої генерації та ВДЕ	Алгоритм прогнозування на довільний період часу та на довільну область прогнозування	Довільний період часу та довільна область прогнозування

Рівень цін на товари замітники та аналоги, а також верхню та нижню межу ціни на ПЗ наведено у табл.4.14.

Таблиця 4.14

Визначення меж встановлення ціни

<i>Рівень цін на товари-замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
>150% від ціни нашого продукту	>150% від ціни нашого продукту	10000	50/150грн

У табл. 4.15 наведено формування системи збуту.

Таблиця 4.15

Формування системи збуту

<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
Задоволення потреб, планування та керування роботою споживачів, отримання рекомендацій на основі прогнозу	Збут товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів	Усі можливі канали збуту (глибока)	Власна

Висновки до четвертого розділу

В результаті проведення аналізу ринку, маркетингового дослідження перспектив реалізації запропонованих науково-технічних рішень надало позитивну інформацію, можна зробити висновок щодо можливого успіху стартап-проекту. Отримана інформація свідчить про те, що ринок щорічно зростає та стабільно розвивається, є вузька клієнтська база, але і ринок не перенасичений, а проблема, яку вирішують технології стартап-проекта є значущою та актуальною. Перешкодами для входження в ринок є конкурентний тиск з боку існуючих фірм на ринку та невисока гнучкість ринку. Але при правильному розставленні пріоритетів та агресивній

маркетинговій кампанії є великі шанси отримати прибуток з проекту, тому його подальша імплементація є доцільною та рентабельною.

ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну проблему застосування чисельних методів для прогнозування значень потоку первинної енергії, зокрема швидкості вітру, для забезпечення ефективної роботи акумулятора у системах розосередженої генерації. Досліджені методи є простими в технічній реалізації і не вимагають обчислень на суперкомп'ютерах, що дозволяє їх застосування при реалізації алгоритмів керування у ситемах розосередженої генерації з відновлюваними джерелами.

1. Проведено дослідження щодо прогнозування значень швидкості вітру методами Гемінга, Адамса, Мілна та Ньютона (1-го степеню). При прогнозуванні на 1 годину похибки склали 23,5%, 22%, 28,8% та 15,5% відповідно.

2. На основі аналізу досліджених методів обрано метод Ньютона, оскільки при його плаваючій обчислювальній складності, що залежить від степеню поліному, при низьких його степенях можна отримати найменшу середню відносну похибку прогнозування.

3. Запропоновано додатковий алгоритм корекції для обраних методів, який дозволяє зменшити середню відносну похибку прогнозування, особливо це стосується методів схеми «предиктор-коректор».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. М. К. Яременко «Відтворюваність вимірів швидкості вітру». XI міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка-2018», с. 288-291.
2. Яременко М. К. Оцінка рівня енергії вітрового потоку за супровідними даними / М. К. Яременко, К. С. Клен. // Мікросистеми, Електроніка та Акустика. – 2019. – С. 56–63.
3. Turkenburg, W. C., D. J. Arent, R. Bertani at al., 2012: Chapter 11 - Renewable Energy. In Global Energy Assessment - Toward a Sustainable Future, Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA and the International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, pp. 761-900.
4. Renewable energy resources [Text] / John Twidell and Anthony Weir. — 2nd ed.
5. “Ostap Semerak: Ukrayina zobov'yazalasya do 11% zbil'shyty chastku vidnovlyuvanoyi energetyky do 2035 roku [Ostap Semerak: Ukraine pledged to increase its share of renewable energy by 11% by 2035].” [Online]. Available: <https://www.kmu.gov.ua/ua/news/ostap-semerak-ukrayina-zobovyazalasya-do-11-zbilshiti-chastku-vidnovlyuvanoyi-energetiki-do-2035-roku>. [Accessed: 17-Apr-2019].
6. Украина почти в 3 раза увеличила темпы установки альтернативных источников энергии [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://delo.ua/business/ukraina-pochti-v-3-raza-velichila-tempy-ustanov-349053/>.
7. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Интеллектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка .- 2010. - №6 . – С.44-50.
8. Ильин В. В. Введение в Smart Grid / В. В. Ильин. // Энергосбережение. – 2012. – №7.

9. Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid. — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
10. Компанеец А. Что такое Smart Grid ? [Электронный ресурс] / А. Компанеец. — 2009. — Режим доступа до ресурсу: <https://www.facepla.net/content-info/art-menu/210-what-is-smart-grid.html>.
11. Стойчев С. В. Разработка алгоритма управления распределенной генерацией / С. В. Стойчев, М. В. Чашко. // Энергетика та енергетичні системи. — 2012. — С. 330–331.
12. Основы вітроенергетики: підручник [Текст] / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. — Д.: НГУ, 2015. — 335 с., Advances in Wind Power
13. Зарядов И. С. Статистический пакет R: теория вероятностей и математическая статистика. / И. С. Зарядов. — Москва, 2010. — 141 с. — (Издательство Российского университета дружбы народов).
14. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции [Текст]. — М.: ДМК Пресс, 2011. — 144с.
15. Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Неисчерпаемая энергия. Кн. 1. Ветроэлектрогенераторы
16. Возобновляемые источники электроэнергии: учебное пособие [Текст] / Б.В. Лукутин. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 184с.
17. Advances in wind power – Рієка: InTech, 2012. — 374 с.
18. Основы вітроенергетики: підручник [Текст] / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д
19. Ветроэнергетика – Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / [В. М. Каргиев, С. Н. Мартиросов, В. П. Муругов та ін.]. — Москва, 2001. — 62 с. — (Интерсоларцентр).
20. Renewable energy resources [Text] / John Twidell and Anthony Weir. — 2nd ed.

21. Відновлювальні джерела енергії [Текст] / В. М. Калініченко, Титко Ришард – Полтава, 2010., В.А. Маляренко Енергетика і навколишнє середовище [Текст], Х.: Видавництво САГА, 2008. – 364 с
22. Renewables 2017 Global Status Report [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2017/06/17-8399_GSR_2017_Full_Report_0621_Opt.pdf.
23. Прогнозирование выработки ВЭС в краткосрочной перспективе [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://uwea.com.ua/uploads/docs/prognozirovanie_vurabotki_ves.pdf.
24. Безруких П.П. Ветроэнергетика. (Справочное и методическое пособие) [Текст]. М.: ИД «ЭНЕРГИЯ», 2010, 320 с.
25. Шулима О. В. Інформаційна технологія планування енергозабезпечення будівель з відновлювальними джерелами енергії [Текст] // Innovative technologies and scientific solutions for industries. 2017. No. 1 (1), стр.90
26. Базюк Т. М. Підвищення енергоефективності локальних систем енергопостачання із активним споживачем та розосередженою генерацією : дис. канд. техн. наук : 05.14.01 / Базюк Тарас Миколайович – Київ, 2016. – 226 с.
27. Осипенко К. С. Керування режимами роботи перетворювачів автономних систем електроживлення : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.09.12 "Напівпровідникові перетворювачі електроенергії" / Осипенко Катерина Сергіївна – Київ, 2016. – 24 с.
28. Кашкаров А.П. Ветрогенераторы, солнечные батареи и другие полезные конструкции [Текст]. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 144с.
29. Аналіз зарубіжної практики впровадження автоматизованих систем управління технологічними процесами в електроенергетиці [Електронний ресурс] // Міністерство енергетики та вугільної промисловості України ДП «НЕК «Укренерго» Науково-технічний центр

електроенергетики. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/2.-SMART-GRID.pdf>

30. Стогній Б.С., Кириленко О.В., Денисюк С.П. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення // Технічна електродинаміка .- 2010. - №6 . – С.44-50.

31. I.Espino, and M. Hernández. 2010. Nowcasting of Wind Speed using Support Vector Regression. Experiments with Time Series from Gran Canaria

32. S. S. Soman, Hamidreza Zareipour, O. Malik, and Paras Mandal, 2010. A Review of Wind Power and Wind Speed Forecasting Methods with Different Time Horizons. North American Power, 2(5): 8-16

33. Системы автоматического управления с параллельной прогнозирующей моделью : монография / А. А. Кобзев [и др.] ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2014. – 160 с. – ISBN 978-5-9984-0507-5.

34. Different Models of Wind Speed Prediction; A Comprehensive Review, International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 5, Issue 1, January-2014 1760 ISSN 2229-5518, S. M. Lawan, W. A. W. Z. Abidin, W. Y. Chai, A. Baharun and T. Masri

35. Wind power forecasting & prediction methods, Renewable Energy, Renewable Energy Journal, 2011

36. The Matrix Time Series Method for MCP, Tom Lambert and Dr. Aden Grue, Mistaya Engineering Inc, Poster presentation from AWEA Windpower 2012, Atlanta, USA, June 3-6, 2012

37. Short-term prediction of wind energy production, Ismael Sanchez, International Journal of Forecasting 22 (2006) 43-56

38. Манусов В. З. Прогнозирование мощности ветроэнергетической установки с учетом климатических факторов / В. З. Манусов, К. Н. Бойко. // Новосибирский государственный технический университет. – С. 210–212.

39. B. Candy, S. J. English, and S. J. Keogh, 2009. A Comparison of the impact of QuikScat and WindSat wind vector products on met office analyses and forecasts, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 47(6):1632-1640
40. A Literature Review of Wind Forecasting Methods, Wen-Yeau Chang, *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, 2, 161-168
41. C. Potter and M. Negnevitsky, 2006. "Very shortterm wind forecasting for Tasmanian power generation", in *Proc. IEEE Trans. Power Syst.* 21(2): 965- 972
42. Rahul Sharma "A Review of Wind Power and Wind Speed Forecasting "International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) , vol. 8, no.7, 2018, pp.01-09
43. Wind Energy Handbook, Tony Burton,David Sharpe,Nick Jenkins,Ervin Bossanyi, John Wiley & Sons, LTD, 2001
44. Measure-Correlate-Predict Methods: Case Studies and Software Implementation, Morten Lybech Thøgersen, Maurizio Motta, Thomas Sørensen, Per Nielsen, EMD International A/S (EMD), 2007
45. Суслов В. И., Ибрагимов Н. М., Талышева Л. П., Цыплаков А. А. Эконометрия. — Новосибирск: СО РАН, 2005. — 744 с. — [ISBN 5-7692-0755-8](#).
46. Ghofrani M. Time Series and Renewable Energy Forecasting / M. Ghofrani, M. Alolayan., 2017.
47. Інтерполяційні формули Ньютона і Лагранджа, наближення сплайнами [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://studopedia.su/14_11969_priklad.html.
48. Схема предиктор-корректор [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%85%D0%B5%D0%BC%D0%B0_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B8%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80-

[%D0%BA%D0%BE%D1%80%D1%80%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80.](#)

49. Дзлиев Г. У. Конспект лекций по математическому моделированию в экологии / Г. У. Дзлиев. – Владикавказ, 2006.

50. Метод Эйлера и его модификации [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: [http://matica.org.ua/metodichki-i-knigi-po-matematike/chislennye-metody/4-3-2-metod-eilera-i-ego-modifikacii.](http://matica.org.ua/metodichki-i-knigi-po-matematike/chislennye-metody/4-3-2-metod-eilera-i-ego-modifikacii)

51. Бахвалов Н.С. Численные методы / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – М.: Бином, 2004. – 634 с.

52. Методы численного решения обыкновенных дифференциальных уравнений [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу:

[http://82.179.144.209/instruado/%D0%91%D0%A5%D0%A2-31/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8/%2309%20-%20%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D0%BA%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D1%83%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9.pdf.](http://82.179.144.209/instruado/%D0%91%D0%A5%D0%A2-31/%D0%9F%D1%80%D0%B8%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4%D0%BD%D0%BE%D0%B5%20%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5/%D0%9B%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8/%2309%20-%20%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D1%8B%20%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B3%D0%BE%20%D1%80%D0%B5%D1%88%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D1%8B%D0%BA%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D0%B4%D0%B8%D1%84%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D1%85%20%D1%83%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BD%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B9.pdf)

53. И. Турчак «Основы численных методов. Учеб. пособие» - М.: Наука, 1987, 320 стр.

54. Белгидромет [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://pogoda.by/>

55. Скачать архивные метеорологические данные Базель [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.meteoblue.com/ru/%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D0%B0/archive/export/%d0%91%d0%b0%d0%b7%d0%b5%d0%bb%d1%8c%d0%a8%d0%b2%d0%b5%d0%b9%d1%86%d0%b0%d1%80%d0%b8%d1%8f2661604>.

56. Startup definition [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.investopedia.com/ask/answers/12/what-is-a-startup.asp>.

57. Что такое стартап? [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://predp.com/startup/main/что-такое-startup.html>.

58. The Ultimate Startup Failure Rate Report [2019] [Электронный ресурс]. – 2019. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.failory.com/blog/startup-failure-rate>.

59. Managing Startup Risks – An Entrepreneur’s Guide [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.startupdecisions.com.sg/startups/launch-and-growth/startup-risk-management/>.

60. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТОК А

Лістинг програмного забезпечення

finite_diff.m:

```
function [y_res] = finite_diff(y, n, p)

if n < 0
    n = length(y) + n;
end

if nargin < 3
    p = 1;
end

if p == 1
    y_res = (y(n + 1) - y(n));
else
    y_new = [];
    for i = 1:length(y)-1
        y_new = [y_new y(i+1)-y(i)];
    end
    y_res = finite_diff(y_new, n, p - 1);
end

end
```

gener.m:

```
function [val] = gener(steps, x_mean, x_sigma)

val = 0;

T = 1; N = steps; dt = T/N;

dW = zeros(1,N);          % preallocate arrays ...

W = zeros(1,N);           % for efficiency

dW(1) = x_mean + x_sigma * sqrt(dt)*randn;

W(1) = dW(1);             % since W(0) = 0 is not allowed

for j = 2:N
```

```

dW(j) = x_mean + x_sigma * sqrt(dt)*randn; % general increment
W(j) = W(j-1) + dW(j);
end
val = W;
end

```

user_correct.m:

```

function [corr_wind] = user_correct(wind_with_predicted, new_wind)
corr_wind = new_wind;
d = 4;
corr_d = 2;
wind_max = 10;
if abs(new_wind - wind_with_predicted(length(wind_with_predicted))) > d
    if new_wind < wind_with_predicted(length(wind_with_predicted))
        corr_wind = wind_with_predicted(length(wind_with_predicted)) - corr_d;
    else
        corr_wind = wind_with_predicted(length(wind_with_predicted)) + corr_d;
    end
end
end
if corr_wind < 0
    corr_wind = 0;
end
if corr_wind > wind_max
    corr_wind = wind_max;
end
end

```

predict_wind_newton.m:

```

function [predicted_wind, avg_real, avg_pred, avg_error] =
predict_wind_newton(time, wind, know, predict, max_iter, prediction_capacity, g, shift, plott)
wind = wind(1:predict);

```

```

if nargin < 5
    max_iter = 1;
end
if nargin < 6
    prediction_capacity = 1;
end
if nargin < 7
    g = 0;
end
if nargin < 8
    shift = 0;
end
if nargin < 9
    plott = 1;
end
if shift > prediction_capacity
    error('shift > prediction capacity');
end
time_with_predicted = time(1:predict);
wind_with_predicted = wind(1:know);
wind_with_predicted_buffer = wind_with_predicted;
predicted_wind = [];
wiener_points = 10;
wiener_t = [];
wiener_wind = [];
g_buffer = gener((predict-know)*wiener_points,0,1);
g_buffer_mean = mean(g_buffer);
correct_eps = 0.01;
g_wind_value = wind(know);
h = 1;

```

```

for i=1:1:predict-know
    if mod(i - 1, prediction_capacity) == 0
        wind_with_predicted_buffer = wind(1:know + i - 1);
    end
    q = 1;
    new_wind_value = newton(wind_with_predicted_buffer, q, max_iter);
    wind_with_predicted_buffer = [wind_with_predicted_buffer, new_wind_value];
    old_new_wind_value = 1000;
    if g == 1
        k = (wind_with_predicted_buffer(know+i) - g_wind_value) / ((time(know+i) -
time(know+i-1)));
        b = wind_with_predicted_buffer(know+i) - time(know+i) * k;
        for r = 0:wiener_points-1
            x = time(know+i-1) + r/(wiener_points-1);
            wiener_t = [wiener_t x];
            g_wind_value = k * x + b;
            g_wind_value = g_wind_value + g_buffer(1) - g_buffer_mean;
            g_buffer = g_buffer(2:length(g_buffer));
            wiener_wind = [wiener_wind g_wind_value];
        end
        new_wind_value = g_wind_value;
    else
        new_wind_value = user_correct(wind_with_predicted, new_wind_value);
    end
    wind_with_predicted_buffer(length(wind_with_predicted_buffer)) = new_wind_value;
    wind_with_predicted = [wind_with_predicted, new_wind_value];
    predicted_wind = [predicted_wind new_wind_value];
end
wind_with_predicted_buffer = wind(1:know);
for i=1:shift

```



```

    new_wind_value = wind_with_predicted_buffer(know + i - 1) + (1 / 24) * 1 * (55 * dd(time,
wind_with_predicted_buffer, know + i - 1) - 59 * dd(time, wind_with_predicted_buffer, know +
i - 2) + 37 * dd(time, wind_with_predicted_buffer, know + i - 3) - 9 * dd(time,
wind_with_predicted_buffer, know + i - 4));

    wind_with_predicted_buffer = [wind_with_predicted_buffer, new_wind_value];

    old_new_wind_value = 1000;

    it = 0;

    while abs(new_wind_value - old_new_wind_value) > correct_eps && it < max_iter

        old_new_wind_value = new_wind_value;

        new_wind_value = wind_with_predicted_buffer(know + i - 1) + (1 / 24) * 1 * (9 * dd(time,
wind_with_predicted_buffer, know + i) - 19 * dd(time, wind_with_predicted_buffer, know + i -
1) - 5 * dd(time, wind_with_predicted_buffer, know + i - 2) + 1 * dd(time,
wind_with_predicted_buffer, know + i - 3));

        wind_with_predicted_buffer(length(wind_with_predicted_buffer)) = new_wind_value;

        it = it + 1;

    end

    iters = [iters it];

    save_new_wind_value = new_wind_value;

    if g == 1

        k = (wind_with_predicted_buffer(know+i) - wind_with_predicted_buffer(know+i-1)) /
((time(know+i) - time(know+i-1)));

        b = wind_with_predicted_buffer(know+i) - time(know+i) * k;

        for r = 0:wiener_points-1

            x = time(know+i-1) + r/(wiener_points-1);

            wiener_t = [wiener_t x];

            g_wind_value = k * x + b;

            g_wind_value = g_wind_value + g_buffer(1) - g_buffer_mean;

            g_buffer = g_buffer(2:length(g_buffer));

            wiener_wind = [wiener_wind g_wind_value];

        end

    else

        new_wind_value = user_correct(wind_with_predicted, new_wind_value);

    end

```

```

wind_with_predicted_buffer(length(wind_with_predicted_buffer)) = save_new_wind_value;

wind_with_predicted = [wind_with_predicted, save_new_wind_value];

predicted_wind = [predicted_wind save_new_wind_value];

end

wiener_wind = fff(time(know:predict), wind_with_predicted(know:predict), predict-
know, wiener_points, 0, 1, 0);

if plott == 1

    figure;

    hold on;

    plot(time(1:predict), wind(1:predict));

end

if g == 0 && plott == 1

    plot(time_with_predicted(know:predict), wind_with_predicted(know:predict), 'r');

end

if plott == 1

    plot([know-1 know-1], [min(wind_with_predicted) max(wind_with_predicted)+1], 'g');

end

if g == 1 && plott == 1

    plot(wiener_t(1:length(wiener_wind)), wiener_wind, 'r');

end

if plott == 1

    grid on;

    xlabel('t, год');

    ylabel('v, м/с');

end

avg_real = mean(wind(know + 1: predict));

avg_pred = mean(wind_with_predicted(know + 1: predict));

if g == 1

    new_wind_with_predicted = [];

    for i = know+1:predict

        k = (wind(i-1) - wind(i)) / ((time(i-1) - time(i)));

```

```

    b = wind(i) - time(i) * k;

    for r = 0:wiener_points-1
        x = time(i-1) + r/(wiener_points);

        tmp = k * x + b;

        new_wind_with_predicted = [new_wind_with_predicted tmp];
    end

end

avg_error = abs(wiener_wind - new_wind_with_predicted);

for i=1:length(avg_error)

    avg_error(i) = avg_error(i) / new_wind_with_predicted(i);

end

avg_error = mean(avg_error);

avg_error = avg_error * 100;

else

    avg_error = abs(wind(know + 1: predict) - wind_with_predicted(know + 1: predict));

    for i=1:length(avg_error)

        avg_error(i) = avg_error(i) / wind(know + i);

        if avg_error(i) > 1

            %avg_error(i) = 1;

        end

    end

    avg_error = mean(avg_error);

    avg_error = avg_error * 100;

end

end

function [y_res] = newton(vt, q, iter)

    q = 0.25;

    y_res = vt(length(vt));

    for i = 1:min([iter length(vt)-1])

```

```
tmp = 1;
for j = 1:i
    tmp = tmp * (q + j - 1);
end
tmp = tmp / factorial(i);
tmp = tmp * finite_diff(vt, -i, i);
y_res = y_res + tmp;
end
end
```

ABSTRACT

Actuality of theme. The significant use of electricity, especially with the use of renewable energy sources, is closely linked to the new direction of the smart energy industry, known worldwide as Smart Grid. Smart Grid is a fully automated power system that provides two-way flow of electricity and information between power stations and devices. By using the latest tools, methods and technologies, Smart Grid provides electricity to the electric power industry to improve the efficiency of power systems. The main problem of ensuring the efficiency of the use of renewable energy sources, including wind turbines, is the unstable and probabilistic nature of the energy at the output of these sources. The presence in the systems of distributed generation of drives, in particular, batteries, indicates the need to predict the values of energy of the primary stream, in particular wind speed, to ensure their efficient operation.

The forecasting of meteorological data, in particular wind speed, is devoted to the works of A. Snitkovsky, A. Lebedev, the prediction of stationary time series - the works of P. Whittle, D. Boks, G. Jenkins.

Therefore, forecasting primary energy flux values to ensure efficient battery operation in distributed generation systems is a relevant topic of research.

Association of work with scientific programs, plans and topics. The dissertation was prepared in accordance with the research plan of the Department of Industrial Electronics of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

The purpose of the study is to determine the optimal numerical method for predicting wind speed for use in distributed generation systems with renewable energy sources.

To achieve this goal, **the following tasks** were solved:

- Review of existing numerical forecasting methods;
- Software implementation of methods;
- Comparison of efficiency of use of methods;
- Development of a method of additional forecast correction.

The object of the study is the methods of forecasting meteorological data are predictive control systems for distributed generation systems.

The subject of the study is the choice of an easy-to-implement method for predicting wind speed values.

Research Methods: Differential equation solving methods were used to solve the tasks set out to build a predictive model of wind speed change. The mathematical calculations were performed on a personal computer using Matlab software.

Scientific novelty of the obtained results:

Wind speed prediction using the Adams, Hemming, and Milne methods is first proposed and compared with the prediction based on Newton's interpolation polynomials (hereinafter referred to as the Newton method).

For the first time, it is suggested to use an additional correction algorithm to improve the prediction results. Based on the analysis of forecasting methods, Newton's method was chosen for controlling the distributed generation systems using a correction algorithm, which allows to provide a minimal error with a small amount of calculations.

The practical significance of the obtained results is to develop recommendations for:

1. Choosing the optimal numerical method for forecasting meteorological data.
2. Determining the optimal number of hours for the forecast.

Personal contribution of the applicant. The dissertation is a synthesis of the results of the researches carried out by the author independently. The work [1] was written personally by the author. In the work published with the co-authors, the dissertation includes: [2] - construction of the matrix of correlation coefficients, plotting of correlation coefficients, approximation of graphs near Fourier.

Examination of the dissertation results. Theoretical provisions and results of the master's study were discussed at: XI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2018", Kyiv, April 3-5, 2018; V Scientific conference of young scientists and students «Generation - Transmission

- Use GPW-2018», VI Scientific conference of young scientists and students «Generation - Transmission - Use GPW-2019».

Publications. The main provisions and results of the master's study are covered in the following publications:

1. MK Yaremenko "Reproducibility of wind speed measurements". Collection of Proceedings of the XI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2018", p. 288-291.

2. Yaremenko MK Estimation of the energy level of wind flow according to the accompanying data / MK Yaremenko, KS Klen // Microsystems, Electronics and Acoustics. - 2019. - Volume 24, No.2. - P. 56–63.

Structure and scope of the thesis. The dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, a list of used sources of 69 titles and xx appendices. The total volume of the dissertation is 95 pages, including 77 pages of the main text, 33 figures and 30 tables.